



**TUGAS AKHIR  
TM 145502 (KE)**

## **STUDI NUMERIK: ANALISA MEDAN ALIRAN 2D BODI PADA MOBIL BASUDEWO**

**PANGKI FERDIANSYAH  
NRP. 2112 030 022**

**Dosen Pembimbing  
Giri Nugroho, ST, MSc.**

**PROGRAM STUDI DIPLOMA III  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015**



**FINAL PROJECT  
TM 145502 (KE)**

# **NUMERICAL STUDY : 2D FLOW FIELD ANALYSIS OF THE BASUDEWO'S CAR BODY**

**PANGKI FERDIANSYAH  
NRP. 2112 030 022**

**Counselor Lecturer  
Giri Nugroho, ST, MSc.**

**DIPLOMA III STUDY PROGRAM  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Institute Technology of Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015**

# **STUDI NUMERIK : ANALISA MEDAN ALIRAN 2D pada BODI MOBIL BASUDEWO**

## **TUGAS AKHIR**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Ahli Madya Teknik Mesin  
Pada**

**Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi Diploma III Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya**

**Oleh :**

**PANGKI FERDIANSYAH**

**NRP. 2112 030 022**

**Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :**

**1. Giri Nugroho, ST, MSc. .... ( Pembimbing )**



**SURABAYA  
Juni 2015**

# STUDI NUMERIK: ANALISA MEDAN ALIRAN 2D PADA BODI MOBIL BASUDEWO

Nama Mahasiswa : Pangki Ferdiansyah  
NRP : 2112 030 022  
Jurusan : D3 Teknik Mesin FTI-ITS  
Dosen Pembimbing : Giri Nugroho, ST, MSc.

## Abstrak

Perkembangan zaman dan teknologi di bidang industri otomotif saat ini telah berkembang sangat pesat. Hal ini menyebabkan produsen otomotif bersaing menciptakan kendaraan yang canggih, ramah lingkungan dan untuk menciptakan performa kendaraan yang tinggi dan hemat bahan bakar. Mobil *Basudewo* merupakan salah satu jenis kendaraan yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan tersebut dengan bahan bakar ethanol.

Tujuan tugas akhir ini untuk mengetahui karakteristik medan aliran fluida melintasi bodi mobil *Basudewo* diantaranya: *contour of pressure*, *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *drag coefficient* ( $C_D$ ) dan *lift coefficient* ( $C_L$ ) menggunakan analisa sudut pandang 2D melalui *software fluent 6.3.26*.

Dari hasil analisa yang melintasi mobil *Basudewo* (tampak samping) didapat *drag coefficient* ( $C_D$ ) sebesar 0,1952 sedangkan *lift coefficient* ( $C_L$ ) sebesar 3,2679. Ketika ditinjau dari *sidebody* maka didapat *drag coefficient* ( $C_D$ ) sebesar 0,6262.

Kata kunci : *contour of pressure*, *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *drag coefficient* ( $C_D$ ), *lift coefficient* ( $C_L$ )

# NUMERICAL STUDY : 2D FLOW FIELD ANALYSIS OF THE BASUDEWO'S CAR BODY FORCE

Name : Pangki Ferdiansyah  
NRP : 2112 030 022  
Major : D3 Teknik Mesin FTI-ITS  
Counselor Lecturer : Giri Nugroho, ST, MSc.

## Abstract

*The development of era and automotive industrial technology these days is really fast. It is because of the competition between automotive's producer who want to create a sophisticated vehicle that environmentally friendly, has high performance and saving fuel. One of the vehicles that built for complete the parameters is Basudewo Car. It uses ethanol for the fuel.*

*Knowing how the characteristic of the fluids domain that flow through the body of Basudewo car is the main goal of this final project. This final project consists of contour of pressure, pressure coefficient ( $C_p$ ), drag coefficient ( $C_D$ ) and lift coefficient ( $C_L$ ) that used for the 2D analysis using a software that called Fluent 6.3.26.*

*From this analysis, it knows the flow that through Basudewo car (beside). The drag coefficient is 0,1952 and lift coefficient is 3,2679. If it observe from the sidebody, the drag coefficient is 0,6262.*

*Keywords: contour of pressure, pressure coefficient ( $C_p$ ), drag coefficient ( $C_D$ ), lift coefficient ( $C_L$ )*

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dengan segala keterbatasannya dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Dalam terselesaikannya tugas akhir ini, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu secara moral maupun materi, yakni:

1. Bapak Giri Nugroho, ST, MSc sebagai dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberikan bimbingan dan ilmu mengenai mekanika fluida yang terkait dengan tugas akhir.
2. Bapak Ir. Suhariyanto, MT selaku Ketua Program Studi Diploma III Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Ibu Liza Rusdiyana, ST, MT selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Diploma III Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
4. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT selaku dosen penguji yang meberikan masukan dan tambahan ilmu.
5. Bapak Ir. Joko Sarsetiyanto, MT selaku dosen penguji yang kritis memberikan saran dan masukan yang berarti.
6. Ir. Denny M.E. Soedjono, MT selaku dosen penguji yang selalu meberikan semangat dan kritikan membangun.
7. Ibu Darojatun Karimah, Ayah Rijanto, Sandika Tri Sucahyo, Tesar Pratama, Shelvi Ria Agustin dan Rio Adi Surya selaku keluarga penulis yang memberikan doa dan motivasinya tiap saat sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
8. Keluarga Nuril Laily Alfany yang selalu mendoakan dan memberi perhatian sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Afrizal Fataad atas kerja samanya dalam mengerjakan dan menjadi *partner* yang baik dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Anang Firmansyah, Ismail Maydiyanto, Iffan Yahya dan Syahrul Niam yang telah membimbing dan mengajari

cara mengaplikasikan *software Fluent, Gambit* dan *Solidworks*.

11. Farras, Dedy, Rana, Anin, Edwin, Nuris, Kadir, Kreshna, Zenny, Udin, Sandro, Faroch, Atik, Andarini dan Eka yang memberikan motivasi selama pembimbingan tugas akhir.
12. Seluruh teman-teman angkatan 2012 yang selalu membantu dan memberikan semangat kepada penulis. Terimakasih atas segala kritik , saran, motivasi dan kebahagiaan yang telah kalian berikan.
13. Seluruh Dosen dan Karyawan yang telah banyak membimbing penulis dalam menggali ilmu di D3 Teknik Mesin ITS.
14. Seluruh pihak yang belum disebutkan di atas yang telah memberikan do'a, bantuan, dan dukungannya bagi penulis hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

Penulis mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan tugas akhir ini. Akhirnya penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvi</b>

### BAB I

<b>PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat Penulisan .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4

### BAB II

<b>DASAR TEORI .....</b>	<b>7</b>
2.1. Mekanika Fluida .....	7
2.2. Udara dan Sifat-sifatnya .....	9
2.2.1. Udara .....	9
2.2.2. Sifat-sifat fluida .....	9
2.2.2.1 Densitas .....	9
2.2.2.2 Viskositas .....	11
2.2.2.3 Bilangan <i>reynolds</i> .....	11
2.3 Teori Aliran Eksternal .....	13
2.3.1. Konsep Lapis Batas ( <i>Boundary Layer</i> ) .....	13
2.3.2. Aliran <i>Nonviscous</i> dan <i>Viscous</i> .....	17
2.3.3. Separasi Aliran .....	18
2.3.3.1 Separasi Aliran 2D .....	19
2.3.3.2 Separasi <i>Bubble</i> .....	23
2.3.3.3 Tekanan statis, stagnasi, dan dinamis .....	25
2.4 Prinsip Dasar Aliran Angin pada Kendaraan .....	28
2.4.1. Pola Aliran di Sekitar Kendaraan .....	29



2.4.2. Pola Aliran di Permukaan Kendaraan .....	31
2.4.3. Pola Aliran di Bawah Kendaraan .....	32
2.4.4. Pola Aliran di Samping Kendaraan .....	33
2.5 Gaya Aerodinamika .....	34
2.6 Gaya hambat ( <i>Drag force</i> ) Aerodinamik .....	36
2.7 Gaya angkat ( <i>Lift force</i> ) Aerodinamik .....	44
2.8 Pengaruharuh Bentuk Bodi .....	45
2.9 Pengaruharuh Bentuk komponen Bodi .....	47
2.10 Dinamika Aliran Fluida secara Komputasi ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> ) .....	54
2.10.1 Gambit ( <i>Geometry and Mesh Building Intelligent Toolkit</i> ) .....	55
2.10.2 <i>Fluent</i> .....	55
2.10.2.1 <i>Grid Independensi</i> .....	56
2.10.2.2 Formulasi <i>Solver</i> .....	56
2.10.2.3 Penentuan Model .....	57
2.10.2.4 Penentuan Kondisi Batas .....	58

### **BAB III**

METODOLOGI PENELITIAN .....	61
3.1. <i>Preprocessing</i> .....	61
3.1.1. Geometri Mobil Pancasona .....	61
3.1.2. Domain Pemodelan .....	63
3.1.3. Meshing .....	64
3.1.4. Parameter Pemodelan .....	72
3.2. <i>Processing</i> atau <i>Solving</i> .....	75
3.3. <i>Postprocessing</i> .....	75
3.4. Alokasi Waktu Penelitian .....	75
3.5. Diagram Alir ( <i>flowchart</i> ) Metode Penelitian .....	76

### **BAB IV**

ANALISA DAN PEMBAHASAN .....	79
4.1. Analisa <i>Grid Independensi</i> .....	79
4.2. Analisa Aliran 2 Dimensi.....	80
4.2.1. Analisa Medan Aliran 2 Dimensi pada Bodi Mobil Basudewo Tampak Samping.....	80

4.2.2. Analisa Medan Aliran 2 Dimensi pada Bodi Mobil Basudewo Tampak Atas.....	85
4.3 Analisa Gaya <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> .....	88
4.4.1. Gaya Hambat ( <i>Drag</i> ) .....	88
4.4.2. Gaya Angkat ( <i>Lift</i> ) .....	90
4.4.3. Gaya Hambat Tampak Atas .....	91

## **BAB V**

### **PENUTUP**

5.1. Kesimpulan.....	93
5.2. Saran.....	93

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Dimensi bodi mobil <i>Basudewo</i> .....	61
Tabel 3.2.	Alokasi waktu penelitian .....	75
Tabel 4.1.	Analisa <i>grid independensi</i> koefisien <i>pressure</i> pada $x=85\%L$ .....	79

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Perbedaan sifat benda solid dengan fluida karena gaya geser .....	8
Gambar 2.2.	Teori terbentuknya <i>boundary layer</i> .....	14
Gambar 2.3.	<i>Boundary layer</i> pada pelat datar .....	15
Gambar 2.4.	<i>Boundary layer</i> di dekat permukaan kendaraan.....	16
Gambar 2.5.	Perbedaan antara fluida ideal dan <i>viscous</i> ...	17
Gambar 2.6.	<i>Boundary layer flow</i> dengan <i>pressure gradient</i> .....	18
Gambar 2.7.	Aliran pada lintasan berbentuk <i>sphere</i> .....	20
Gambar 2.8.a	Aliran <i>incompressible</i> melewati bola ( <i>sphere</i> )	20
Gambar 2.8.b	Separasi aliran melewati benda <i>streamline</i> .....	20
Gambar 2.9.	<i>Details Viscous flow</i> pada sekitar <i>airfoil</i> .....	22
Gambar 2.10.	Deskripsi skematik separasi <i>bubble</i> dan transisi lapisan batas .....	23
Gambar 2.11.	Distribusi tekanan pada separasi <i>bubble</i> .....	24
Gambar 2.12.	Separasi <i>bubble</i> pada bodi kendaraan .....	24
Gambar 2.13.	Pengukuran tekanan statis.....	25
Gambar 2.14.	Pengukuran tekanan stagnasi .....	27
Gambar 2.15.	Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis .....	27
Gambar 2.16.	Pola aliran udara 2D pada kendaraan.....	29
Gambar 2.17.	Pola aliran udara disekitar kendaraan .....	30
Gambar 2.18.	Pola aliran udara dipermukaan kendaraan .....	31
Gambar 2.19.	Pola aliran udara antara profil udara bebas dan permukaan.....	32
Gambar 2.20.	Pola aliran udara dibagian samping dan belakang kendaraan .....	34
Gambar 2.21.	Gaya dan momen aerodinamik pada kendaraan .....	35
Gambar 2.22.	Hambatan bentuk pada kendaraan .....	36
Gambar 2.23.	Perubahan koefisien <i>drag</i> pada mobil.....	37

Gambar 2.24.	<i>Control volume</i> untuk memperoleh drag pada bodi 2-Dimensi .....	38
Gambar 2.25.	Bentuk <i>trailing vortice</i> pada aliran melewati bodi mobil dengan <i>ground effect</i> sudut pandang 2D maupun 3D .....	43
Gambar 2.26.	Distribusi tekanan penyebab gaya angkat ( <i>lift force</i> ).....	44
Gambar 2.27.	Tahap Perancangan bodi kendaraan dan pengaruhnya terhadap gaya hambat.....	46
Gambar 2.28.	Penelitian terhadap pengurangan luasan <i>frontal body</i> mobil.....	47
Gambar 2.29.	Aliran separasi pada kap mobil.....	48
Gambar 2.30.	Grafik distribusi tekanan pada <i>forebody</i> mobil	49
Gambar 2.31.	Separasi pada kap .....	49
Gambar 2.32.	Penyatuan aliran pada kaca.....	50
Gambar 2.33.	Pengaruh konveksitas pada koefisien <i>drag</i> .....	50
Gambar 2.34.a	Tipikal <i>Flow</i> yang terjadi pada bodi <i>Streamline</i> .....	51
Gambar 2.34.b	Pengaruh kemiringan bagian belakang ( <i>rear end/difusser</i> ) terhadap <i>drag</i> .....	51
Gambar 2.35	Pengaruh kemiringan $\alpha$ terhadap $C_D$ dan $C_L$ ....	52
Gambar 2.36	Pengaruh kekasaran daerah <i>Underbody</i> terhadap koefisien <i>Drag</i> .....	53
Gambar 2.37	Blok diagram simulasi dengan <i>CFD</i> .....	54
Gambar 3.1.	<i>Basudewo EV</i> .....	62
Gambar 3.2.	Geometri 2D bodi <i>Basudewo EV</i> .....	62
Gambar 3.3.	<i>Geometri</i> bodi mobil <i>Basudewo</i> tampak <i>asimetric</i> , tampak atas, tampak depan, dan tampak samping .....	63
Gambar 3.4.	<i>Domain</i> Pemodelan Bodi Tampak Samping (2D <i>flow</i> ).....	64
Gambar 3.5.	<i>Domain</i> Pemodelan Bodi Tampak Atas (2D <i>flow</i> ) .....	64
Gambar 3.6.	<i>Import</i> geometri pada Gambit.....	65
Gambar 3.7.	<i>Facing</i> 2D Tampak Samping.....	66

Gambar 3.8.	<i>Facing</i> 2D Tampak Atas.....	66
Gambar 3.9.	Menu <i>Meshing</i> .....	67
Gambar 3.10.	<i>Meshing</i> 2D Tampak Samping .....	67
Gambar 3.11.	<i>Meshing</i> 2D Tampak Atas .....	67
Gambar 3.12.	Kualitas <i>Meshing</i> Bentuk <i>Map</i> dan Tampilan Elemen Penyusun <i>Meshing</i> dengan Kualitas .....	68
Gambar 3.13.	Daerah batas kecepatan <i>inlet</i> .....	69
Gambar 3.14.	Daerah batas <i>control volume outlet</i> .....	69
Gambar 3.15.	Daerah batas dinding atas dan bawah .....	70
Gambar 3.16.	Daerah batas bodi mobil <i>upperside</i> .....	70
Gambar 3.17.	Daerah batas bodi mobil <i>lowerside</i> .....	71
Gambar 3.18.	Daerah <i>mesh</i> yang didefinisikan sebagai fluida .....	72
Gambar 3.19.	meng-export ke <i>filetype</i> ; .....	72
Gambar 3.20.	<i>Flowchart</i> metodologi penelitian.....	77
Gambar 4.1.	Grafik distribusi koefisien tekanan vs l (m) pada sepanjang bodi mobil <i>Basudewo standart</i> .....	80
Gambar 4.2.	<i>Contour</i> koefisien tekanan dipermukaan bodi <i>Basudewo EV</i> tampak samping.....	81
Gambar 4.3.	Distribusi <i>vector velocity</i> dan <i>pathlines velocity</i> pada pemodelan 2D bodi mobil <i>Basudewo</i> <i>standart</i> (tampak samping) .....	84
Gambar 4.4.	Distribusi <i>vector velocity</i> (tidak terjadi <i>backflow</i> ) .....	85
Gambar 4.5.	Grafik distribusi koefisien tekanan vs l (m) pada sepanjang bodi <i>Basudewo EV standart</i> .....	85
Gambar 4.6.	<i>Contour</i> koefisien tekanan dipermukaan bodi <i>Basudewo EV</i> tampak atas .....	87
Gambar 4.7.	Distribusi <i>vector velocity</i> dan <i>pathlines velocity</i> pada pemodelan 2D bodi <i>Basudewo EV standart</i> (tampak atas).....	88
Gambar 4.8.	<i>Surface integrals</i> .....	89
Gambar 4.9.	<i>Reference values</i> .....	89
Gambar 4.10.	Gaya <i>drag</i> dan koefisien <i>drag</i> yang diperoleh. .....	90



Gambar 4.11.	Gaya <i>lift</i> dan koefisien <i>lift</i> yang diperoleh.....	91
Gambar 4.12.	Gaya <i>drag</i> dan Koefisien <i>drag</i> yang diperoleh pada tampak atas.....	91

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan zaman dan teknologi di bidang industri otomotif saat ini telah berkembang sangat pesat. Hal ini menyebabkan produsen otomotif bersaing menciptakan kendaraan yang canggih, ramah lingkungan dan untuk menciptakan performa kendaraan yang tinggi dan hemat bahan bakar maka ada empat parameter penting yang harus dipenuhi yaitu efisiensi mesin, cara mengemudi, berat kendaraan dan gaya hambat aerodinamika. Aspek aerodinamika sangat erat kaitannya dengan proses perancangan desain bodi mobil dan secara tidak langsung dapat mengoptimalkan *engine power*, hemat bahan bakar dan terjaminnya stabilitas mobil. Gaya aerodinamika yang terjadi pada mobil meliputi gaya hambat (*drag force*), gaya angkat (*lift force*) dan gaya samping (*side force*) yang tentunya dipengaruhi oleh kecepatan.

Tidak hanya produsen otomotif, Perguruan tinggi pun di Indonesia juga berlomba-lomba untuk menciptakan mobil yang irit bahan bakar, ramah terhadap lingkungan dan memiliki efisiensi tinggi untuk dikompetisikan, salah satu diantaranya adalah *Basudewo EV (Ethanol Vehicle)* dari Program Studi D3 Teknik Mesin FTI-ITS dengan menggunakan bahan bakar jenis *ethanol* untuk mengikuti *IEMC (Indonesia Energy Marathon Challenge)*. Dengan bersumber pada ilmu mekanika fluida, pesatnya pengembangan ilmu aerodinamika dan juga pemodelan numerik aliran fluida, maka sangat memungkinkan mendesain bodi kendaraan, khususnya mobil bahan bakar alternatif, yang memiliki gaya hambat aerodinamika sekecil mungkin. Untuk mengarah ke konsep optimalisasi dari bentuk bodi kendaraan tersebut, para peneliti sering menggunakan analisis aliran fluida yang melintasi bodi kendaraan 2D.

Sejumlah penelitian yang telah dilakukan banyak mengkaji aliran 2D pada bodi tunggal dengan memfokuskan pada *leading edge*. Berada pada daerah *Chord line* membuat *Leading edge* yang merupakan bagian awal dari kendaraan yang pertama kali

terkena aliran udara. Oleh sebab itu, bentuk dan desain dari *leading edge* menentukan konfigurasi maupun pola aliran dibelakangnya (*downstream*). Diharapkan juga bisa mendapatkan analisa terhadap gaya *drag* dan *lift* serta struktur *wake* sehingga nilai  $C_D$ ,  $C_L$ , dan  $C_p$  didapatkan dengan optimal. Dengan didapakkannya data yang optimal, pembuatan bentuk bodi kendaraan akan mempengaruhi gaya hambat aerodinamika pada bodi mobil guna peningkatan efisiensi pemakaian etanol sebagai bahan bakar.

## 1.2 Rumusan Masalah

Terlihat saat ini bodi mobil *Basudewo* memiliki geometri bagian depan (*leading edge*) tumpul dan tidak *smooth* yang memungkinkan terjadinya *multi-stagnation point* (area bertekanan tinggi). Selain itu bentuk geometri bagian belakang (*rear end*) juga menyerupai segi empat. Perbedaan tekanan antara *leading edge* dan *rearend* ini akan mengakibatkan *drag force* yang melawan pergerakan bodi. Semakin besar perbedaan tekanan antara keduanya akan mengakibatkan semakin besarnya *drag force* yang dihasilkan. Rear end yang menyerupai segi empat akan lebih mempercepat adanya separasi (aliran terpisah) yang lebih besar. Adanya separasi akan menghasilkan area bertekanan rendah di belakang bodi yang disebut *wake*.

Selain itu terlihat lengkungan pada bagian *upperside*. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya *bubble separation* sebelum memasuki daerah separasi yang seharusnya, yaitu pada bagian belakang mobil. Untuk mengetahui aerodinamis bodi kendaraan, maka diperlukan karakteristik aliran fluida yang lebih jelas pada software CFD. Inilah permasalahan dari tugas akhir ini, bagaimana karakteristik aliran fluida yang melintasi bodi *Basudewo EV* dengan desain yang tergambar sudah sesuai dengan regulasi *Indonesian Energy Marathon Challenge* (IEMC) 2015. Tugas akhir ini pun menampilkan karakteristik aliran fluida dengan tampilan 2D baik tampak atas ataupun tampak samping dengan menggunakan software *Fluent 6.3.26*, sehingga terlihat karakteristik aliran fluida yang melintasi bodi mobil.

### 1.3 Tujuan

Tujuan dilakukakannya penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran fluida secara 2D beserta efek gaya aerodinamika yang ditimbulkan pada saat melintasi bodi mobil *Basudewo*. Melalui pemodelan numerik *Computational Fluid Dynamic* (CFD) akan dikaji beberapa karakteristik aliran 2D ,dan berikut parameternya :

1. Analisa nilai distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur bodi mobil *Basudewo*.
2. Analisa nilai distribusi koefisien drag ( $C_D$ ) pada kontur bodi mobil *Basudewo*.
3. Analisa nilai distribusi koefisien lift ( $C_L$ ) pada kontur bodi mobil *Basudewo*.
4. Mengetahui tampilan *contour of pressure*, *pathlines* dan *velocity vector* yang melintasi bodi *Basudewo*.

### 1.4 Batasan Masalah

Untuk memperkecil ruang lingkup dan untuk memudahkan dalam analisis masalah dibutuhkan adanya pembatasan masalah. Batasan masalah yang dipergunakan pada penelitian untuk tugas akhir dengan perangkat lunak *Fluent 6.3.26* antara lain:

1. Kondisi *steady state* dan aliran *incompressible*.
2. Menggunakan perangkat lunak *Fluent 6.3.26*.
3. Pengujian pada kondisi udara *standart* dengan menggunakan  $Re_L = 2,108527 \times 10^6$
4. Pembahasan hanya pada *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *drag coefficient* ( $C_D$ ), dan *lift coefficient* ( $C_L$ ).
5. Simulasi numerik dilakukan dengan *ground clearance* sebesar 100mm tanpa adanya aksesoris kendaraan seperti : roda, ban cadangan ,kaca spion maupun beberapa aksesoris tambahan yang dipasang pada bodi mobil.
6. Analisa aliran 2D menggunakan model turbulen *k-ε realizable*, *boundary condition* untuk *inlet* adalah *velocity inlet* dengan kecepatan aliran udara masuk sebesar 11,11 m/s dan *outlet* adalah *outflow*.

## 1.5 Manfaat Penulisan

Manfaat yang dapat diambil dari penulisan tugas akhir ini diantaranya adalah:

1. Mengetahui fenomena aliran secara fisis dari analisa aliran 2D disekitar bodi mobil *Basudewo* melalui visualisasi aliran dengan perangkat lunak *Fluent 6.3.26* akibat pengaruh bentuk *leading edge*, *rear end*, dan *ground clearance*.
2. Mampu memahami, menjelaskan pengaruh bentuk *leading edge*, *rear end*, dan *ground clearance* terhadap karakteristik aliran disekitar bodi mobil *Basudewo* secara standart.
3. Mampu memberikan sumbangsih nyata pada optimalisasi bodi kendaraan yang nantinya bisa digunakan sebagai rujukan pengembangan *Basudewo EV*.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini disusun sebagai berikut :

### BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang penulisan, perumusan masalah yang dipilih, tujuan penulisan, manfaat penulisan, batasan permasalahan dan sistematika penulisan.

### BAB II DASAR TEORI

Bab ini menerangkan tentang persamaan - persamaan yang mendasari atas perumusan masalah, teori *external flow*, gaya angkat, gaya hambat, pengaruh bentuk bodi, dan pengenalan *software FLUENT 6.3.26*.

### BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang langkah-langkah pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak *Fluent 6.3.26*, tahapan penelitian melalui pembuatan diagram alir, menguraikan pemodelan numerik yang dilakukan, mulai dari pembuatan geometri model uji,

diskretisasi daerah analisa (*meshing*), dan pemodelan pada *FLUENT* 6.3.26.

#### BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data yang diperoleh saat simulasi dilakukan yaitu berupa hasil *contour* tekanan, grafik *pressure coefficient* ( $C_P$ ), *drag coefficient* ( $C_D$ ), *lift coefficient* ( $C_L$ ), dan *pathline* yang dihasilkan serta pembahasan data yang diperoleh selama percobaan dilakukan.

#### BAB V PENUTUP

Bab ini terdiri dari 2 sub bab , yaitu kesimpulan yang diperoleh selama pembuatan tugas akhir ini yang merupakan ringkasan jawaban dari hasil numerik (*post processing*) dari permasalahan yang dipilih serta berisikan saran-saran dari penulis yang perlu diberikan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

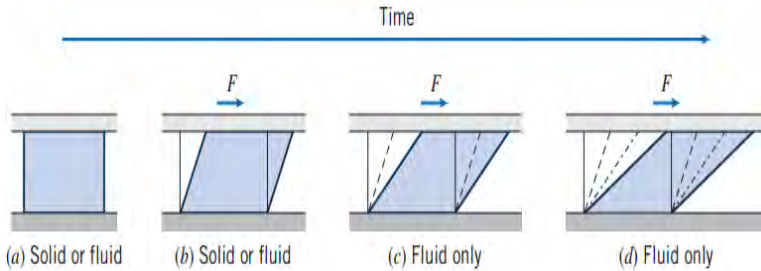
#### **2.1. Mekanika Fluida**

Mekanika Fluida adalah cabang dari ilmu yang mempelajari mengenai zat fluida (cairan dan gas) bergerak atau diam serta gaya akibat yang ditimbulkan oleh fluida tersebut pada batasnya. Mekanika fluida dapat dibagi menjadi fluida statis dan fluida dinamik. Fluida statis mempelajari fluida pada keadaan diam sementara fluida dinamis mempelajari fluida yang bergerak dan interaksi fluida dengan padatan atau fluida lain pada permukaan batasnya. Sedangkan fluida sendiri merupakan zat yang akan mengalami deformasi secara terus menerus (*continue*) jika diberikan tegangan geser (tangensial) seberapa kecil tegangan geser tersebut. Batas tersebut dapat berupa permukaan padat atau fluida lainnya.

Pembahasan tentang fluida yang bergerak yaitu dengan mengembangkan persamaan-persamaan dasar untuk pengetrapan teori analisis berdasarkan volume atur. Analisis didasarkan pada volume atur, karena: Pertama, fluida sebagai media dapat mengalami distorsi dan deformasi secara terus menerus dan oleh karenanya sangat sulit sekali untuk mengidentifikasi suatu massa yang sama di setiap saat. Kedua, lebih sering berurusan dengan pengaruh dari gerakan fluida secara menyeluruh terhadap suatu peralatan maupun terhadap bangunan konstruksi tertentu.

Secara umum ada perbedaan antara fluida dengan benda solid, dimana benda solid tidak terjadi deformasi secara kontinyu selama gaya ( $F$ ) yang dikenakan lebih kecil dibanding batas elastisnya. Sedangkan fluida sendiri akan mengalami deformasi secara terus menerus jika di berikan tegangan geser (tangensial) seiring berjalannya waktu, seberapa kecil tegangan geser tersebut tidak akan berpengaruh. Kondisi di lapangan menyatakan bahwa apabila fluida berada dalam keseimbangan, fluida tidak dapat menahan gaya tangensial atau gaya geser. Berikut merupakan visualisasi sifat fluida jika dibandingkan dengan benda solid.





Gambar 2.1 Perbedaan sifat benda solid dengan fluida  
karena gaya geser  
(Fox And McDonald's, 8<sup>th</sup> edition)

Fluida memiliki sifat mengikuti perubahan bentuk wadah serta kemampuannya untuk mengalir menuju suatu tempat. Sifat ini dikarenakan salah satu dari sifat ketidakmampuan fluida melawan tegangan geser (*shear stress*) yang terjadi khususnya dalam kondisi *static equilibrium*.

Berdasarkan pergerakan partikelnya, aliran fluida dibedakan menjadi aliran *laminar* dan *turbulen*. Aliran *laminar* merupakan aliran fluida yang bergerak dengan kondisi lapisan-lapisan (*lamina-lamina*) yang membentuk garis-garis alir dan tidak berpotongan satu sama lain. Aliran *turbulen* adalah aliran fluida yang partikel-partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan berfluktuasi yang saling interaksi. Akibat dari hal itu maka garis alir antar partikel fluidanya akan saling berpotongan. Untuk menentukan aliran fluida tersebut aliran *laminar* ataupun aliran *turbulen* dapat dilihat dari nilai bilangan *reynold* –nya, pada *externalflow* (aliran tersebut melewati suatu *contourbody* yang berada pada aliran fluida tanpa batas), pada aliran *laminar* bilangan *reynold* –nya  $\leq 5 \times 10^5$ , dan pada aliran *turbulen* bilangan *reynold* –nya  $> 5 \times 10^5$ , sedangkan untuk *internal flow* (aliran fluida melewati sistem perpipaan), pada aliran *laminar* bilangan *reynold* –nya  $\leq 2300$ , dan pada aliran *turbulen* bilangan *reynold* –nya  $> 2300$ .

Aliran fluida diklasifikasikan berdasarkan perubahan terhadap waktu yaitu aliran tunak (*steady flow*) dan aliran tak

tunak (*unsteady flow*). Aliran tunak (*steady flow*) terjadi jika kondisi fluida pada titik manapun tidak terjadi perubahan kecepatan terhadap waktu dengan jangka waktu yang tidak terbatas dan dapat dinotasikan dengan  $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ , apabila pada kondisi kecepatan aliran berubah terhadap waktu  $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$ , maka aliran tersebut digolongkan menjadi aliran tak tunak (*unsteady flow*).

## 2.2. Udara dan sifat-sifatnya

### 2.2.1 Udara

Udara adalah jenis fluida yang memiliki densitas dan viskositas. Densitas ( $\rho$ ) didefinisikan sebagai massa persatuan volume. Properti ini tergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Kendaraan di jalan pada umumnya berjalan dengan kecepatan dibawah sepertiga kecepatan suara. Pada batas kecepatan tersebut harga variasi tekanan dan temperatur dalam aliran dengan harga *freestream* sangat kecil, oleh karena itu perubahan pada densitas dapat diabaikan. Dengan demikian aliran udara yang mengalir di sekeliling kendaraan dapat dikategorikan sebagai aliran fluida *incompressible*. Untuk kondisi standar,  $P = 1$  atm dan  $T = 288$  K, harga densitas atau  $\rho = 1,2250 \text{ kg/m}^3$ .

Properti lainnya dari udara adalah viskositas. Properti ini disebabkan oleh gesekan molekuler antara partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum karena *gradient* kecepatan. Untuk fluida *incompressible*, properti ini bergantung pada temperatur. Pada kondisi standar viskositas  $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  dan  $\nu = 1,4607 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Viskositas yang dimiliki fluida ini menyebabkan terjadinya *friction drag* sehingga timbul gradien kecepatan pada dinding.

### 2.2.2 Sifat-Sifat Fluida

#### 2.2.2.1 Densitas

Densitas ( $\rho$ ) didefinisikan sebagai kerapatan suatu zat yang dinyatakan banyaknya zat (massa) per satuan volume.

Properti ini tergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Densitas dapat dinyatakan dalam tiga bentuk, yaitu:

1) *Densitas Massa*

Merupakan perbandingan jumlah massa dengan jumlah volume. Densitas massa dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan :

$$\rho = \frac{m}{V} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:  $m$  = massa (kg)

$V$  = volume ( $m^3$ )

$\rho$  = massa jenis ( $kg/m^3$ )

Harga standarnya pada tekanan  $p = 1,01325 \times 10^5$  N/ $m^2$  dengan temperatur 288,15 K sehingga densitas udara 1,23  $kg/m^3$  dan untuk air adalah 1000  $kg/m^3$ .

2) *Berat Spesifik (Specific Weight)*

Berat spesifik ini didefinisikan sebagai perkalian antara rapat/densitas massa dan gravitasi dari suatu substansi yang dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\gamma = \rho \cdot g \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:  $\gamma$  = berat spesifik (N/ $m^3$ )

Untuk ( $\gamma_{\text{udara}} = 12,07$  N/ $m^3$ ) dan ( $\gamma_{\text{air}} = 9,81 \times 10^3$  N/ $m^3$ ).

3) *Densitas Relatif (Specific Gravity)*

Densitas relatif disebut juga *specific gravity* (SG) yaitu perbandingan antara berat spesifik suatu zat dengan berat spesifik air. biasanya yang dijadikan acuan adalah kerapatan air pada suhu 4 derajat celcius. Karena kerapatan semua zat cair bergantung pada temperatur serta tekanan, maka temperatur zat cair yang dipertanyakan, serta temperatur air dijadikan acuan, harus

dinyatakan untuk mendapatkan harga-harga gravitasi yang tepat.

$$SG = \frac{\gamma_{zat}}{\gamma_{air}} \dots \dots \dots (2.3)$$

### 2.2.2.2 Viskositas

Viskositas adalah ukuran ketahanan fluida terhadap deformasi, sedangkan viskositas sendiri disebabkan oleh gesekan molekuler antara partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum karena *gradient* kecepatan. Untuk fluida *incompressible*, properti ini bergantung pada temperatur. Seluruh fluida (kecuali superfluida) memiliki ketahanan dari tekanan dan oleh karena itu disebut kental, tetapi fluida yang tidak memiliki ketahanan tekanan dan tegangan disebut fluide ideal. Viskositas dinyatakan dalam dua bentuk yaitu:

#### 1) Viskositas Dinamis ( $\mu$ )

Merupakan perbandingan tegangan geser dengan laju perubahannya, besarnya viskositas air bervariasi dan dipengaruhi oleh temperatur. Pada kondisi standar (temperatur kamar 26,5°C) besar viskositas dinamik adalah  $\mu_{air} = 8,6 \times 10^{-4} \text{ N s/m}^2$  dan  $\mu_{udara} = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ N s/m}^2$

#### 2) Viskositas Kinematik ( $\nu$ )

Merupakan perbandingan viskositas dinamik ( $\mu$ ) terhadap kerapatan/density ( $\rho$ ) :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots \dots \dots (2.4)$$

Viskositas kinematik muncul dalam banyak terapan, misalnya dalam bilangan *reynold* yang tanpa dimensi. Untuk  $\nu_{air}$  pada temperatur 26,5°C ialah  $8,6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  dan  $\nu_{udara} 1,4607 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

### 2.2.2.3 Bilangan Reynolds

Kondisi aliran *laminar* atau *turbulen* dapat dinyatakan dengan bilangan *Reynolds* untuk aliran *incompressible*. Jenis lapis

batas pada aliran udara yang mengalir suatu obyek juga sangat ditentukan oleh bilangan *Reynolds* (*Re*). Hal ini dapat dijelaskan bahwa dalam lapis batas gaya geser dan gaya inersia sangat penting. Sedangkan bilangan *Reynolds* sendiri menggambarkan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya geser yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu.

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{Gaya geser}} \dots \dots \dots (2.5)$$

dimana : Gaya Inersia  $= p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2$

$$\text{Gaya Geser} = \tau \times A = \left( \frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2$$

Sehingga,

▪ Untuk aliran eksternal

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left( \frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} \dots \dots \dots (2.6)$$

dimana :  $\rho$  : Densitas fluida

$U_{\infty}$  : Kecepatan aliran *free stream* fluida

$L$  : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, dalam kasus ini digunakan diameter hidrolis, yaitu  $D_h$

$\mu$  : Viskositas dinamis fluida

Sehingga ,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu}$$

▪ Untuk aliran internal

Diameter hidrolis ( $D_h$ ) digunakan untuk perhitungansaluran yang tidak berbentuk bundar. Diameter hidrolis dapat didefinisikan sebagai

$$D_h = \frac{4.A}{P} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :       $A$  = Luas penampang  
                      $P$  = keliling penampang

Sehingga,

$$Re_h = \frac{\rho.U_{\infty}.D_h}{\mu} \dots\dots\dots (2.8)$$

## 2.3 Teori Aliran Eksternal (*External Flow Theory*)

Aliran eksternal merupakan aliran yang terjadi pada fluida yang tidak terlindungi. Baik internal maupun eksternal, dapat berupa laminar ataupun turbulen, kompresibel ataupun inkompresibel. Merupakan aliran fluida yang tidak dibatasi oleh permukaan benda, namun seakan – akan permukaan bendalah yang dibatasi oleh aliran fluida tersebut.

### 2.3.1 Konsep Lapis Batas (*Boundary layer*)

Suatu aliran disebut sebagai aliran eksternal(*external flow*) bila aliran tersebut melewati suatu *contour body* yang berada pada aliran fluida tanpa adanya batas yang mengurung. Sebagai contoh aliran eksternal adalah aliran fluida yang melewati sisi luar dari permukaan lengkung dan pelat datar (*semi-infinite flat plate*).

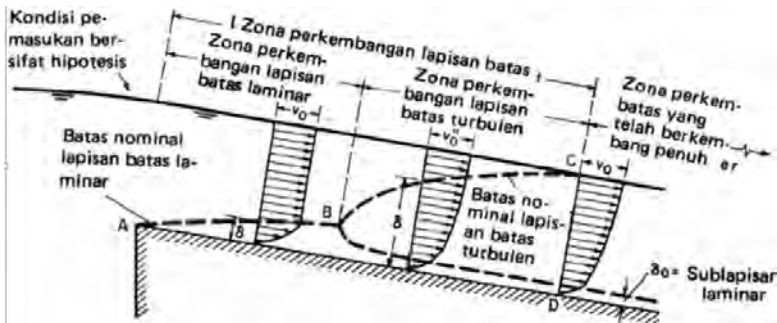
*Boundary layer* (lapis batas) merupakan suatu lapisan tipis pada *solid surface* yang terbatas daerah sangat sempit dekat permukaan kontur dengan kecepatan fluida tidak uniform dikarenakan tegangan geser yang muncul akibat viskositas. Dimana di dalam lapisan tersebut pengaruh viscositas maupun gaya inerti sangat berarti.

Dari penjelasan di atas, aliran melintasi suatu kontur diklasifikasikan menjadi dua daerah yaitu :

1. Daerah di dalam lapis batas (dekat permukaan kontur) dengan efek viskositas yang sangat berpengaruh (*viscous flow*).

2. Daerah di luar lapis batas dengan efek viskositas diabaikan (*nonviscous flow*).

Teori terbentuknya lapisan batas (*boundary layer*) akan dijelaskan pada gambar dibawah ini



Gambar 2.2 Teori terbentuknya *boundary layer*

Masdi, S.K 2012 (<https://septiankmasdi.wordpress.com/page/2/>)

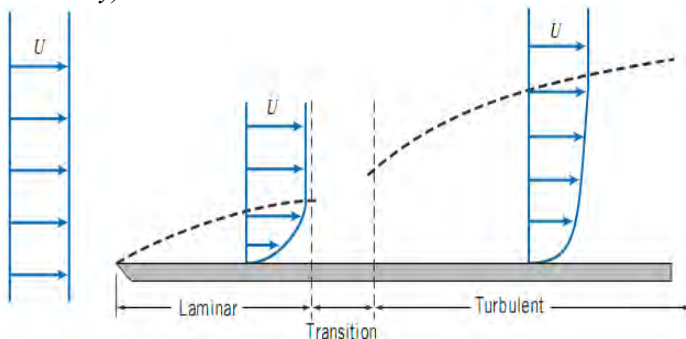
Aliran diawali dengan aliran *laminar* yang menghasilkan apisan batas *laminar* berupa kurva AB dengan distribusi bersifat *parabolis*. Aliran yang dilanjutkan bersifat turbulen dengan titik bahan pada titik perubahan pada titik B. Garis BC merupakan lapisan batas turbulen dengan distribusi bersifat logaritmis. *Sub lapisan laminar* akan terbentuk apabila permukaan saluran relatif halus dengan kecepatan rendah. Di dalam sub lapisan ini aliran bersifat *laminar* dan di atasnya merupakan zona peralihan dari sifat *laminar* ke *turbulen*. Lapisan batas *turbulen* CD dengan pola tertentu akan terbentuk apabila aliran seragam sepanjang saluran.

Ketika aliran fluida nyata dari *free stream* menuju suatu *contour body*, fluida mengalami perubahan kecepatan dari keadaan *uniform* ( $U_{\infty}$ ) ke kondisi aliran yang mempunyai distribusi kecepatan (*velocity distribution*). Hal ini terjadi karena pengaruh dari viskositas fluida dan *contour body* yang dilewatinya. Distribusi kecepatan diawali dari suatu titik yang harga kecepatannya nol (*zero velocity*), yaitu tepat pada

permukaan bodi yang dilewati aliran. Dimana vektor kecepatan menyinggung *streamline* secara tegak lurus terhadap arah normal dan besarnya kecepatan makin bertambah bila titik pengamatan makin menjauhi kontur / *wall (finite)* hingga mencapai harga kecepatan pada *free stream* bila aliran sudah tidak terpengaruh oleh dinding (*wall*). Kondisi transisi terjadi bila kecepatan fluida berubah dari kecepatan yang tidak sama dengan kecepatan *free stream* menjadi *free stream*. Hal ini terjadi pada suatu lapisan tipis (*layer*) dekat dengan *wall* yang Oleh **L. Prandtl (1904)** lapisan ini disebut *boundary layer* atau *frictional layer* karena terjadi efek friksi pada daerah ini. Distribusi kecepatan tersebut akan terjadi selama fluida melewati kontur body dengan ketebalan *boundary layer* yang semakin bertambah dari *leading edge* ke belakang.

Struktur *boundary layer flow* dapat digambarkan dengan mengamati gerakan partikel fluida. Saat mengalir diluar *boundary layer*, partikel mempertahankan bentuk asalnya sambil bergerak translasi namun tidak berotasi dan efek *viscosity* dapat diabaikan. Kondisi dengan *zero vorticity* ini dinamakan *irrotational*.

Gangguan mulai terjadi saat partikel memasuki *boundary layer* karena adanya *velocity gradient* dan efek *viscosity*. Akibatnya, selama bergerak translasi, partikel fluida juga bergerak rotasi. Dengan demikian *vorticity*-nya tidak sama dengan nol (*non zero vorticity*). Kondisi ini dinamakan *rotational*.

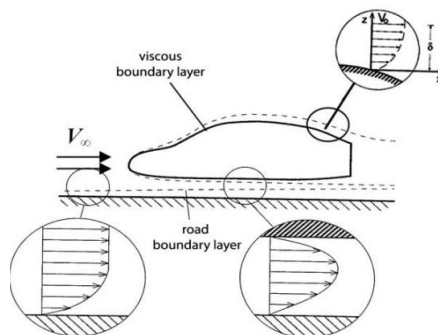


Gambar 2.3 *Boundary layer* pada pelat datar  
(Fox dan Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)



Gambar diatas memperlihatkan suatu fluida mengalir dengan distribusi kecepatan yang sama atau uniform ( $U$ ). Ketika melewati suatu solid surface, aliran tersebut mengalami distribusi kecepatan yang berbeda sebagai pengaruh adanya tegangan geser pada permukaan padat. Distribusi kecepatan ini dimulai dari titik di permukaan padat tersebut, dimana aliran fluida mempunyai kecepatan nol. Kemudian menjadi semakin besar ketika menjauhi permukaan bodi. Pengaruh tegangan geser akan hilang pada posisi tertentu dan kecepatan fluida mencapai harga kecepatan fluida *non viscous* ( $u = 0,99 U$ ). Posisi tersebut merupakan batas daerah viscous dengan bagian *non viscous*. Jarak yang terukur dari permukaan padat arah normal hingga posisi tersebut disebut tebal lapis batas (*boundary layer thickness*, ( $\delta$ )). Dimana tebal lapis batasnya akan meningkat seiring dengan bertambahnya jarak atau lintasan yang dilalui oleh fluida.

Lapis batas pada permukaan padat akan berkembang dari ujung plat (Leading edge). Tebal lapis batas pada daerah leading edge masih tipis dimana partikel-partikel bergerak secara berlapis-lapis dan lapis batas yang terjadi disebut lapis batas laminar. Semakin jauh fluida bergerak dari ujung plat, lapis batas akan semakin berkembang dan aliran akan berubah mendekati turbulen.



Gambar 2.4 *Boundary layer* didekat permukaan kendaraan

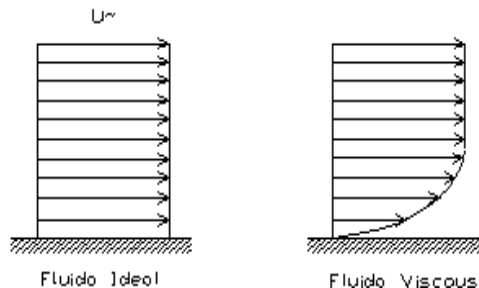
Ketebalan dari lapis batas sekitar beberapa mm didepan kendaraan yang melaju pada 100 km/jam ,dan beberapa cm pada bagian belakangnya. Seperti yang diketahui, semakin tebal lapis

batas berkontribusi pada terbentuknya *viscous friction drag* yang semakin besar.

### 2.3.2 Aliran *Nonviscous* dan *Viscous*

Pada dasarnya aliran terbagi atas dua jenis yaitu aliran *viscous* dan aliran *non viscous*. Aliran *non viscous* adalah aliran nonkompresibel yang tidak mengalami gesekan sehingga mempunyai gradien kecepatan mendekati nol atau tegangan gesernya mendekati nol. Aliran *non viscous* bukan berarti bahwa aliran tidak mempunyai viskositas atau  $\mu = 0$ , ini dikarenakan setiap fluida pasti mempunyai viskositas tertentu. Sedangkan untuk aliran *viscous*, fluida yang masih dipengaruhi oleh viskositas atau kekentalan. Dan merupakan sifat yang ada dalam fluida yang menentukan karakteritas fluida tersebut. Viskositas juga merupakan hasil dari gaya-gaya yang dihasilkan saat lapisan fluida tersebut bergesekan dengan benda lain efek dari viskositasnya akan mengikutkan tegangan geser antara partikel fluida dengan permukaan padat yang dilaluinya.

Pada aliran fluida ideal, semua partikel akan bergerak pada kecepatan yang sama, tetapi pada aliran *viscous* yang mengikutkan tegangan geser akan menjadikan profil kecepatan fluidanya akan menjadi tidak seragam seperti gambar 2.5 dibawah ini



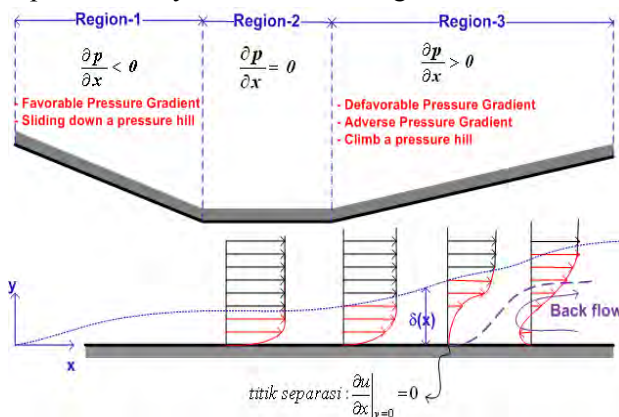
Gambar 2.5 Perbedaan antara fluida ideal dan *viscous*  
(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

Untuk aliran *viscous*, kecepatan fluida tepat berada diatas permukaan padat sama dengan nol. Semakin jauh dari permukaan

padat, secara bertahap tegangan geser yang terjadi semakin berkurang. Sehingga berangsur-angsur juga kecepatan aliran akan menjadi membesar. Pada suatu titik tertentu pengaruh tegangan geser terhadap aliran akan hilang, sehingga kecepatan aliran akan mencapai harga sama dengan aliran bebasnya.

### 2.3.3 Separasi Aliran Pada Boundary Layer

Dalam *boundary layer* akan ditemukan suatu fenomena yang disebut dengan separasi. Separasi mengakibatkan aliran yang terbalik arahnya dari aliran utama. Separasi merupakan peristiwa dimana aliran fluida terpisah dari permukaan benda. Proses separasi diawali dengan adanya aliran fluida yang terus menerus mengalami perubahan karena adanya gaya gesek. Akibat adanya gaya gesek tersebut, momentum aliran akan berkurang sampai suatu saat momentum alirannya sudah tidak bisa mengatasi hambatan sehingga aliran fluida akan terpisah dari permukaan benda. Pada titik dimana separasi terjadi, *gradient* tekanan pada permukaan bodi adalah nol  $y=0=0$  dan aliran fluida di belakang titik separasi arahnya berlawanan dengan aliran utama.



Gambar 2.6 *Boundary layer flow* dengan *pressure gradient*.  
(Fox dan Mc. Donald, 1998)

Separasi sangat dipengaruhi oleh *gradient* tekanan sepanjang aliran, khususnya oleh *adverse pressure gradient*, yaitu

tekanan yang semakin meningkat sejajar dengan arah aliran sepanjang permukaan benda kerja  $\frac{dp}{dx} > 0$ . Pada daerah *adverse pressure gradient*, aliran fluida akan mengalami hambatan selain karena adanya gaya gesek juga karena adanya kenaikan tekanan pada arah aliran fluida. Pada saat momentum fluida sudah tidak dapat melawan hambatan ini, aliran fluida tidak akan bisa bergerak lebih jauh sepanjang permukaan benda hingga aliran akan mengalami separasi.

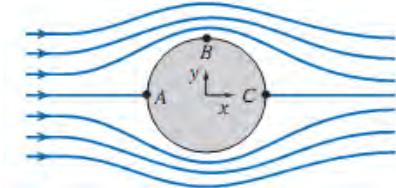
### 2.3.3.1 Separasi Aliran Dua-Dimensi (2D)

Separasi pada aliran fluida dua dimensi membawa kerugian pada aliran *laminar* atau aliran yang dalam kondisi paralel. Aliran *laminar* dua dimensi akan dirusak oleh efek friksi dan adanya *adverse pressure gradient* pada permukaan dari solid. Separasi ini dimulai pada titik dimana perubahan kecepatan ke arah y sama dengan nol. Hal ini dapat dilihat dalam gambar 2.7.

*Vorticity* yang terjadi pada titik ini sangat besar sehingga momentum yang ada mulai dirusak *vorticity* tersebut dan terjadilah *vortex*. *Vortex* merupakan daerah di belakang daerah separasi. Ada dua daerah yang ada pada daerah separasi ini yaitu daerah *laminar* yang terseparasi dan daerah resirkulasi. Daerah separasi tersebut semakin ke belakang semakin besar sampai pada suatu titik dimana alirannya sudah kembali ke kondisi paralel (alirannya sudah paralel), dan hal ini dikenal dengan *reattachment*. Pada titik ini momentum yang terdapat di dalam aliran fluida ini sudah dapat mengatasi *adverse pressure gradient* yang terjadi sebelumnya atau dengan kata lain momentumnya sudah mendapatkan tambahan kembali dari kondisi *freestream*-nya. Namun aliran ini sudah berubah menjadi aliran yang *turbulen* karena penambahan momentum yang ada tersebut melebihi dari kondisi *laminar*-nya. Aliran yang *turbulen* ini baik sekali untuk mengatasi *adverse pressure gradient*.

Pada aliran fluida yang melintasi suatu permukaan berbentuk kurva (melengkung) maka distribusi tekanan dan distribusi kecepatan akan mengalami perubahan. Pada sebuah sirkular silinder yang dilalui oleh aliran fluida dalam sebuah medan aliran *incompressible* diasumsikan sebagai aliran *inviscid*

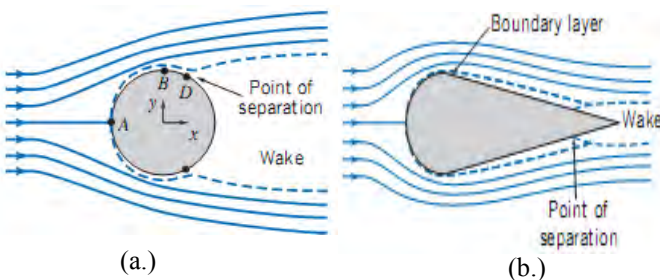
sehingga aliran tampak simetris baik ke arah  $y$  maupun  $x$ . Seperti tampak pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.7 Aliran pada lintasan berbentuk *sphere*  
(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

Kecepatan yang mengelilingi silinder meningkat sampai suatu titik maksimum D dan kemudian berkurang saat bergerak lebih jauh ke belakang dari titik D. Titik D disebut titik separasi (*separation point*), dimana partikel fluida mendorong objek dan menyebabkan terjadinya *wake*.

Pada suatu aliran *inviscid* peningkatan distribusi kecepatan dihubungkan oleh pengurangan distribusi tekanan pada aliran yang melintasi profil silinder tersebut. Sehingga pada suatu aliran *incompressible inviscid flow* yang melintasi silinder, distribusi tekanan sepanjang permukaan dari silinder berkurang saat berjalan dari A-D dan akan meningkat lagi saat bergerak dari D-E. Pada aliran *viscous steady incompressible* bentuk aliran akan tampak seperti gambar berikut ini :



Gambar 2.8 (a) Aliran *incompressible* melewati bola (*sphere*)  
(b) Separasi aliran melewati benda *streamline*  
(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

Pada gambar 2.8 *b* bagaimana bentuk streamline bekerja. Gaya drag pada kebanyakan aerodinamik karena tekanan rendah pada *wake*: jika *wake* dapat dikurangi atau dihapus, drag akan dapat banyak dikurangi. Jika kita membuat bola menyerupai bentuk air mata pada gambar 2.8 *b* streamline terbuka, dan tekanan akan meningkat dengan pelan, seperti memperpanjang aliran sehingga partikel aliran tidak didorong untuk memisahkan dari objek sampai mencapai akhir dari objek. *Wake* yang terjadi lebih kecil, sehingga mengurangi tekanan drag. Hanya satu aspek negatif dari *streamline* ini adalah luas permukaan total dengan gesekan terjadi lebih besar, sehingga drag karena gesekan akan sedikit berkurang.

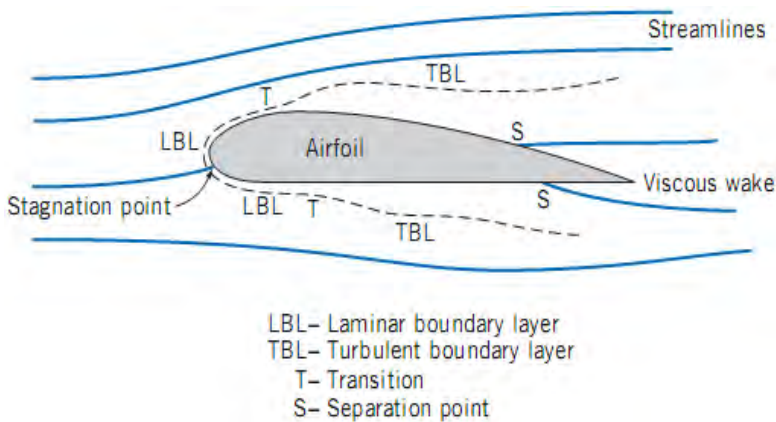
Namun pada aliran setelah titik B tekanan akan meningkat dalam arah aliran sehingga pada beberapa titik momentum aliran dari fluida didalam *boundary layer* tidak cukup untuk membawa elemen jauh kedalam daerah peningkatan tekanan sehingga aliran fluida yang berdekatan pada permukaan akan mengalami pemecahan ke arah balik dan aliran akan terseparasi dari permukaan. Hasil dari separasi *boundary layer* pada daerah *relative* tekanan rendah dibelakang body yang mana momentum alirannya tidak mencukupi disebut *wake*.

Separasi aliran sangat rentan terjadi pada aliran laminar. Hal ini disebabkan oleh momentum yang dimilikinya cukup besar untuk mengatasi efek kumulatif *adverse pressure* dan *shear stress*. Mulainya separasi aliran ditandai dengan  $(\partial u / \partial y)_{y=0} = 0$ . Aliran yang terseparasi dapat dibagi menjadi dua daerah, yaitu: daerah laminar terseparasi (*separated laminar flow*), dekat batas aliran *nonviscous*, dan pada daerah resirkulasi, disekitar permukaan kontur. Selama berlangsungnya peristiwa separasi, muncul interaksi antara aliran *nonviscous* dengan *boundary layer*, sehingga terjadi *supply energy* atau momentum dari *nonviscous* ke *boundary layer* terseparasi. Proses ini disebut *entrainment*.

Dengan demikian ada kemungkinan aliran sehat kembali asalkan jumlah kumulatif momentum aliran dapat mengatasi efek tekanan balik (*adverse pressure gradient*) sebelum mencapai *trailing edge*. Ketika aliran sehat kembali, karakternya adalah *turbulen*, ini berarti peristiwa separasi adalah terjadinya

perubahan karakteristik aliran dari laminar, transisi, kemudian *turbulen* yang dikenal sebagai pembentukan *bubble*.

Pada aliran fluida yang melewati *streamlining body*, dimana tekanan dan efek *viscous* sangat penting. Bentuk *streamlining body* akan mengurangi besarnya adverse *pressure gradient* karena adanya penyebaran kenaikan tekanan pada jarak yang cukup panjang. Bodi seperti ini juga membuat penundaan separasi aliran sehingga secara signifikan gaya *drag* menjadi berkurang. Pada daerah *upstream* awalnya aliran adalah *laminar* dengan membentuk *laminar boundary layer* kemudian setelah mengenai leading edge terjadi transisi aliran pada titik T kondisi aliran berubah menjadi *turbulen* dan lapisan batas yang terbentuk adalah *turbulent boundary layer*. Karena *streamline* tidak bisa mengikuti kontur profil maka aliran terseparasi dan membentuk daerah bertekanan rendah dibelakang *airfoil*, daerah ini disebut *wake*. Visualisasi aliran dapat dilihat pada gambar 2.9.

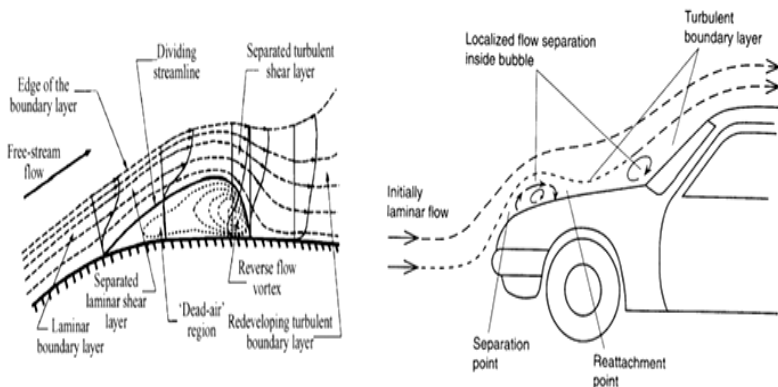


Gambar 2.9 *Details Viscous flow* pada sekitar *airfoil*.  
(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

### 2.3.3.2 Separasi *Bubble*

Separasi *bubble* merupakan separasi yang dilanjutkan dengan penyentuhan kembali fluida yang telah terseparasi ke *solid body*. Seperti terlihat pada gambar 2.10 .

Separasi *bubble* dimulai dengan terpisahnya *boundary layer laminar* dari dinding. Tepi *boundary layer* terangkat dan *shear layer laminar* yang terseparasi akan berinteraksi dengan *free stream*. Aliran mendapat injeksi/dorongan energi dari *free stream* yang kemudian memaksa *shear layer* untuk *attach* kembali ke *solid body*. Setelah mencapai titik *reattachment*, aliran diperlambat lagi karena adanya gesekan dan *adverse pressure gradient* yang lebih kuat, sehingga terjadi separasi *massive*.



Gambar 2.10 Deskripsi skematik separasi *bubble* dan transisi lapisan batas

(Bao, F. and Dallmann, 2003)

Daerah di bawah *shear layer laminar*, yang merupakan *downstream* dari titik separasi (dimulai dari titik dimana *dividing streamline* meninggalkan dinding), adalah daerah tertutup berisi *recirculating flow* dengan kecepatan lambat. Sedangkan fluida yang di dekat dinding seolah-olah diam sehingga disebut *dead-air region*. Selain itu nilai *wall pressure* dalam daerah aliran yang terseparasi adalah konstan kecuali daerah belakang *bubble* dimana terjadi osilasi tekanan yang kuat. Hal ini dikarenakan pusat *recirculating flow* berada dekat bagian belakang *bubble*.

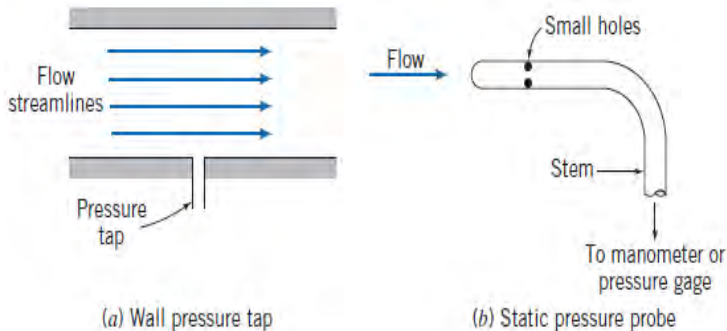




### 2.3.3.3 Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis

Tekanan  $P$  yang digunakan pada persamaan Bernoulli adalah tekanan termodinamis atau lebih dikenal dengan tekanan statis. Tekanan statis adalah tekanan yang diukur oleh alat ukur yang bergerak bersama-sama aliran dengan kecepatan yang sama. Bagaimanapun juga cara pengukuran yang demikian sangat sulit dilakukan. Oleh karena itu perlu ada cara yang praktis untuk mengukurnya.

Fluida yang mengalir lurus akan mempunyai *streamlines* lurus pula dan tidak mempunyai variasi tekanan ke arah normal dari aliran *streamlines* tersebut. Kenyataan ini memungkinkan untuk melakukan pengukuran tekanan statis dengan menggunakan *wall pressure tap* yang ditempatkan di daerah dimana aliran *streamlines* lurus, seperti yang terlihat pada gambar 2.13 dibawah ini.



Gambar 2.13 Pengukuran tekanan statis  
(Fox and McDonald's, 8<sup>th</sup> edition)

*Pressure tap* adalah sebuah lubang kecil yang dibuat pada dinding dimana axisnya tegak lurus terhadap permukaan dinding. Apabila lubang tersebut tegak lurus terhadap dinding suatu saluran dan bebas dari kotoran, akurasi pengukuran tekanan statis akan dapat diperoleh dengan menghubungkan *pressure tap* dengan suatu alat ukur yang sesuai. Apabila fluida mengalir jauh dari dinding atau bila *streamlines*-nya berbentuk kurva, akurasi pengukuran tekanan statis dapat diperoleh dengan menggunakan

*pressure probe*, seperti yang terlihat pada gambar 2.9. Tekanan stagnasi adalah tekanan yang dapat diukur bila aliran diperlambat sampai kecepatannya sama dengan nol dengan proses tanpa gesekan. Pada aliran *incompressible*, persamaan Bernoulli dapat digunakan sehubungan dengan perubahan kecepatan dan tekanan sepanjang *streamlines*. Dengan mengabaikan diferensial elevasi, persamaan Bernoulli menjadi :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{konstan}$$

Bila tekanan statis  $p$  pada suatu titik dalam suatu aliran dimana kecepatannya adalah  $V$ , maka tekanan stagnasi  $p_o$ , dimana kecepatan stagnasi  $V_o$  adalah nol, maka :

$$\frac{p_o}{\rho} + \frac{V_o^2}{2} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$

dimana  $V_o = 0$ , sehingga :

$$\frac{p_o}{\rho} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$

atau,

$$p_o = p + \frac{1}{2} \rho V^2$$

Persamaan di atas adalah kalimat matematis dari definisi tekanan stagnasi, yang valid untuk aliran *incompressible*. Bentuk  $\frac{1}{2} \rho V^2$  umumnya disebut tekanan dinamis. Jadi persamaan

tekanan dinamis adalah :

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = p_o - p$$

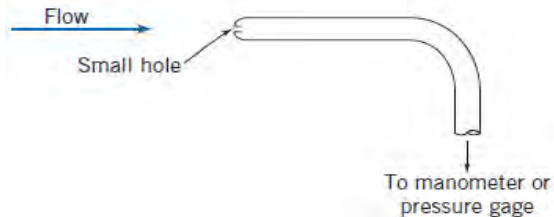
dan kecepatannya adalah :

$$V = \sqrt{\frac{2(p_o - p)}{\rho}} \dots\dots\dots (2.9)$$

(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

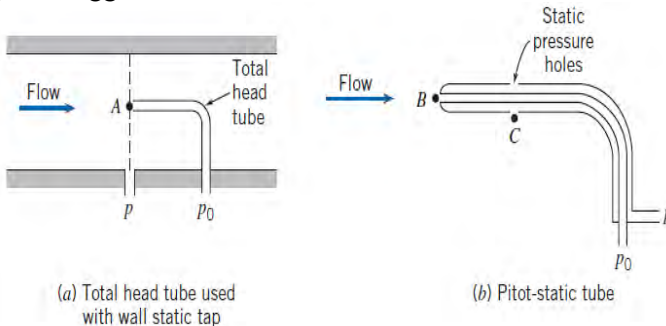
Jadi, bila tekanan stagnasi dan tekanan statis diukur pada suatu titik, maka persamaan kecepatan diatas akan menghasilkan kecepatan aliran lokal.

Tekanan stagnasi dapat diukur dengan menggunakan sebuah *probe* dimana lubangnya langsung berhadapan dengan aliran seperti terlihat pada gambar 2.14. *Probe* ini dikenal dengan nama *stagnation pressure probe* atau *pitot tube*. Daerah pengukurannya juga harus sejajar dengan arah aliran lokal.



Gambar 2.14 Pengukuran tekanan stagnasi  
(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

Pada gambar 2.14 terlihat bahwa tekanan statis yang sejajar dengan garis di titik A dapat dibaca dari *wall static pressure tap*. Sedangkan tekanan stagnasi dapat diukur langsung pada titik A dengan menggunakan *total head tube*.



Gambar 2.15 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis  
(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

Terkadang dua buah *probe* dapat dikombinasikan seperti pada *pitot-static tube* (gambar 2.15 b). Tabung bagian dalam digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi pada titik B,

sedangkan tekanan statis pada titik C dibaca melalui lubang-lubang kecil pada tabung bagian luar. Pada daerah aliran dimana variasi tekanan statis dalam arah *streamwise*-nya kecil, *pitot-static tube* dapat digunakan untuk mencari kecepatan pada titik B, dengan menggunakan persamaan kecepatan di atas dan mengasumsikan  $p_b = p_c$

Perbedaan antara tekanan lokal statik pada setiap titik dalam aliran dengan tekanan statik pada *freestream* bergantung langsung dengan tekanan dinamik pada *freestream*, dan perbandingan ini yang disebut dengan koefisien tekanan atau *pressure coefficient* ( $C_p$ ).

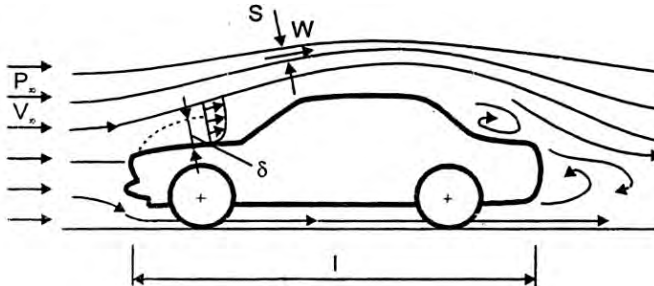
$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

(Barnard R.H, 1996)

- Dimana :      $P$  = tekanan *local static* atau tekanan pada kontur
- $P_\infty$  = tekanan statik *freestream*
- $V_\infty$  = kecepatan *freestream*

**2.4 Prinsip Dasar Aliran Angin pada Kendaraan**

Secara umum fenomena aliran pada kendaraan dapat dikategorikan dalam 2 aliran yaitu aliran *external* dan aliran *internal*. Aliran *external* adalah aliran udara yang terletak di sekitar kendaraan dan aliran udara yang masuk ke dalam bagian mesin. Aliran *internal* adalah aliran yang terletak dalam bagian permesinan misalnya proses aliran fluida di dalam mesin dan sistem transmisi kendaraan



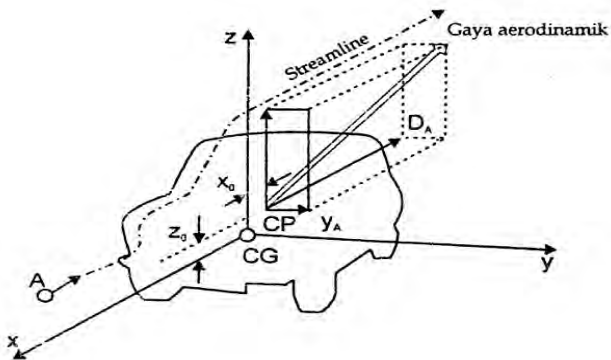
Gambar 2.16 Pola aliran udara 2D pada kendaraan  
(Sutantra I N, 2001)

Pola aliran di sekitar bodi kendaraan dapat dilihat pada gambar 2.16. Pada gambar ini menggambarkan terjadinya gaya dan momen aerodinamis pada kendaraan yang nantinya juga akan berpengaruh terhadap gaya hambat (*drag*) dari kendaraan.

#### 2.4.1 Pola Aliran di Sekitar Kendaraan

Kendaraan bermotor yang sedang berjalan mempunyai dua bidang kontak yaitu terhadap udara dan terhadap jalan/tanah. Kendaraan yang berjalan akan bergerak relatif terhadap jalan/tanah. Apabila udara diam yaitu pada keadaan tidak ada angin maka kendaraan akan memiliki kecepatan relatif yang sama terhadap jalan/tanah dan juga terhadap udara. Sedangkan jika ada aliran udara relatif terhadap tanah yaitu ada angin yang berhembus, maka kendaraan akan memiliki perbedaan kecepatan relatif terhadap jalan/tanah dan terhadap udara.

Di dalam pendekatan terhadap aerodinamika kendaraan, diasumsikan tidak ada angin yang berhembus (atmosfir sebagai kesatuan tanah) dan kecepatan kendaraan dapat dianggap konstan. Pada dasarnya semua fenomena aerodinamis yang terjadi pada kendaraan disebabkan adanya gerakan relatif dari udara di sepanjang bentuk bodi kendaraan.



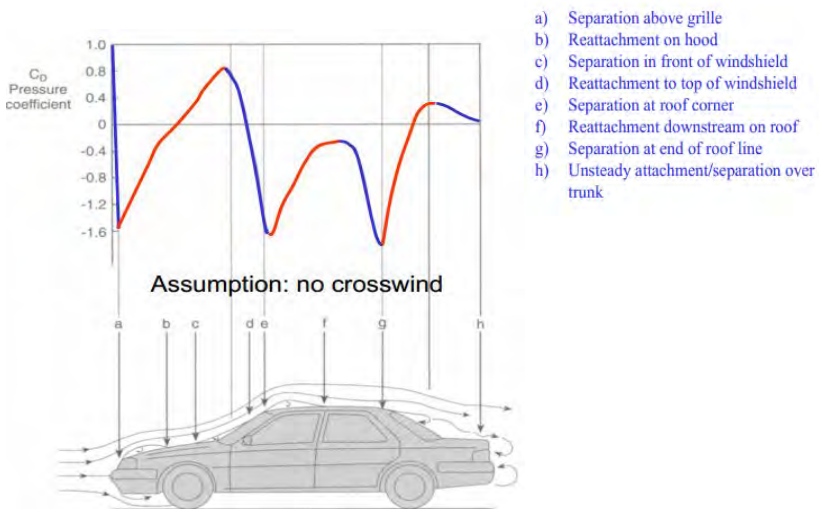
Gambar 2.17 Pola aliran udara disekitar kendaraan  
(Sutantra I N, 2001)

Pada gambar 2.17 dapat diketahui jika pada waktu itu tidak ada angin yang berhembus dan diasumsikan kecepatan mobil konstan, maka partikel udara berikutnya juga akan melewati titik A tersebut dan mengikuti alur lintasan yang sama. Dengan demikian dapat didefinisikan *streamline* adalah garis-garis yang dibuat di dalam medan kecepatan sehingga setiap saat garis-garis tersebut akan searah dengan aliran disetiap titik didalam medan aliran tersebut.

*Streamline* pada tempat yang jauh dari kendaraan akan sejajar dan tidak terganggu. Sedangkan *streamline* di sekitar kendaraan akan mempunyai pola aliran yang sangat kompleks dikarenakan bentuk kendaraan itu sendiri yang kompleks sehingga di sekeliling kendaraan akan terdapat daerah gangguan aliran udara. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa gerakan dari partikel yang terletak jauh dari kendaraan akan memiliki kecepatan relatif yang sama dengan kecepatan kendaraan. Sedangkan pada daerah gangguan di sekeliling kendaraan, maka kecepatan relatif dari partikel sangat bervariasi, lebih besar atau lebih kecil dari kecepatan aktual kendaraan.

### 2.4.2 Pola Aliran di Permukaan Kendaraan

Pola aliran pada permukaan kendaraan akan menyebabkan adanya efek viskositas. Karena adanya efek viskositas dari udara maka dapat menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan kendaraan sehingga timbul *gradient* kecepatan pada permukaan kendaraan. Adanya *gradient* kecepatan menyebabkan kecepatan aliran udara pada permukaan kendaraan sangat bervariasi tergantung dari bentuk dan jenis kendaraan tersebut. Dengan adanya *gradient* kecepatan maka akan timbul distribusi tekanan di sepanjang permukaan kendaraan



Gambar 2.18 Pola aliran udara dipermukaan kendaraan  
(Barnard R.H & Drew Landman)

Bagian depan kendaraan merupakan daerah tekanan positif. Hal ini disebabkan adanya efek tabrakan aliran udara pada bagian depan sehingga laju aliran lebih lambat dan mengakibatkan daerah tekanan tinggi. Pada posisi stagnasi (nilai  $C_p = 1$ ) yang merupakan daerah tekanan tertinggi dimana energi kinetis aliran udara diubah menjadi energi potensial, kecepatan aliran nol sehingga tekanannya tertinggi. Dari posisi titik stagnasi, aliran udara akan mengalir kembali sehingga akan terjadi penurunan

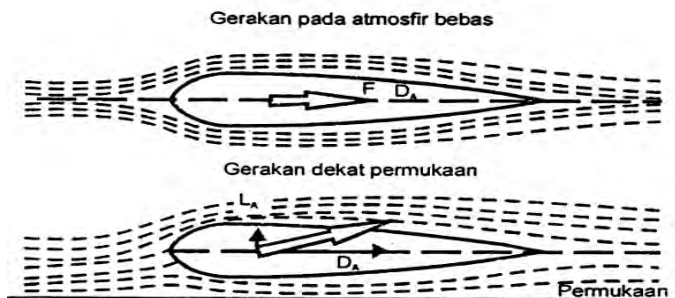


tekanan tetapi masih dalam range  $C_p$  positif yang berarti bahwa tekanan di daerah sekitar mobil tersebut masih lebih besar dibandingkan dengan tekanan aliran bebas. Hal ini menyebabkan kecepatan aliran udara lokal bertambah cepat dan lebih besar dibanding aliran udara bebas. Pada permukaan profil lekukan pada kap mesin kendaraan akan mengalami pengurangan kecepatan aliran udara karena adanya hambatan, sehingga terjadi separasi dan kenaikan tekanan bertambah besar terus sampai titik penyatuan kembali (*reattachment line*).

Kemudian aliran udara mengalir kembali semakin cepat sampai tekanan turun. Kecepatan aliran udara akan berkurang dan tekanan bertambah akibat profil lekukan ujung atap. Pada daerah belakang mobil akan terjadi separasi akibat aliran udara lepas dari bodi sehingga akan ada daerah bertekanan rendah. Efek separasi pada permukaan atas kendaraan ini yang akan menaikkan tekanan pada kendaraan sehingga gaya hambat aerodinamis (*drag*) yang ditimbulkan akan lebih besar.

### 2.4.3 Pola Aliran di Bawah Kendaraan

Suatu pola aliran udara di sekitar suatu profil yang bergerak pada atmosfer bebas berbeda dengan suatu profil yang bergerak dekat tanah (*ground*).



Gambar 2.19 Pola aliran udara antara profil udara bebas dan permukaan

(Sutantra I N, 2001)

Diambil contoh suatu aerofoil yang bergerak pada atmosfer bebas akan mempunyai pola aliran udara yang simetris sehingga mempunyai distribusi tekanan yang simetris antara bagian atas

dan bawah profil dan akibatnya tidak akan timbul gaya *lift*. Pada aerofoil yang bergerak dekat dengan tanah akan menimbulkan pola aliran yang tidak simetris dengan sumbu aerofoil sehingga akan menimbulkan gaya aerodinamis. Gaya aerodinamis bekerja miring terhadap sumbu kendaraan dan dapat timbul gaya *drag* dan *lift*. Sehingga dapat dikatakan tekanan yang dihasilkan pada bawah kendaraan lebih besar daripada permukaan atas kendaraan.

Pada permukaan kendaraan yang bergerak dekat dengan tanah, permukaan atas mobil memiliki kelengkungan lebih besar daripada permukaan bawah, sebagai akibatnya jarak yang ditempuh aliran udara pada permukaan atas lebih panjang daripada permukaan bawah kendaraan pada periode waktu yang sama. Hal ini menyebabkan aliran udara pada permukaan atas lebih cepat dan tekanannya lebih rendah dibanding permukaan bawah.

Menurut hukum kontinuitas, semakin dekat suatu profil bergerak diatas tanah kecepatan aliran udara di antara profil dan tanah akan semakin tinggi karena adanya pengecilan luasan, sehingga tekanan yang dihasilkan akan semakin mengecil. Tetapi pada kondisi real, dimana aliran udara memiliki viskositas maka pada jarak *ground clearance* yang sangat kecil akan berbentuk *boundary layer* pada tanah. *Boundary layer* tersebut akan mengadakan interaksi satu sama lain sehingga akan memperlambat kecepatan aliran tekanan yang dihasilkan semakin besar.

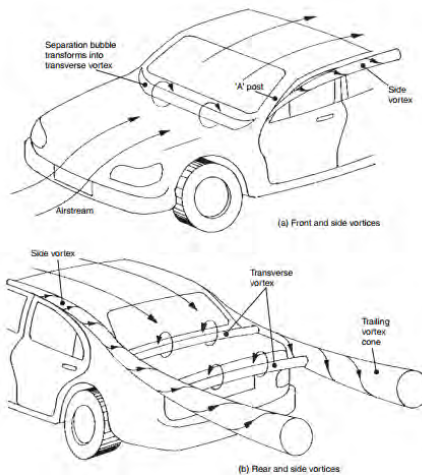
Pada kendaraan, kecepatan aliran udara pada bagian bawah juga dipengaruhi oleh suatu profil mesin bagian bawah dan kekasaran permukaan. Adanya berbagai tonjolan profil mesin pada bagian bawah akan menyebabkan separasi aliran sehingga kecepatan aliran rendah dan tekanan semakin besar.

#### **2.4.4 Pola Aliran di Samping Kendaraan**

Kecepatan aliran udara di sepanjang bagian samping kendaraan rata-rata lebih cepat dibandingkan bagian bawah kendaraan. Hal ini menyebabkan adanya gerakan aliran udara dari bagian bawah kendaraan menuju bagian samping kendaraan dan pada kecepatan tinggi akan membentuk rotasi berbentuk pusaran

atau *vortex*. *Vortex* ini terjadi di sepanjang bodi mobil (*attached vortex*) dan di bagian belakang mobil (*trailing vortex*).

Adanya perbedaan tekanan pada bagian pilar belakang yaitu antara bagian samping kendaraan dengan kemiringan kaca belakang akan menimbulkan *vortex*. Dengan demikian pada bagian belakang akan terjadi suatu pola aliran udara yang sangat kompleks dimana terjadi penyatuan *attached vortex* dan *vortex* pilar sehingga dibelakang kendaraan akan terbentuk aliran *turbulen*. Formasi *trailing vortex* pada bagian belakang kendaraan dapat dilihat pada gambar 2.20 dibawah ini.



Gambar 2.20 Pola aliran udara dibagian samping dan belakang kendaraan  
(Heinz Heisler, 2<sup>nd</sup> edition)

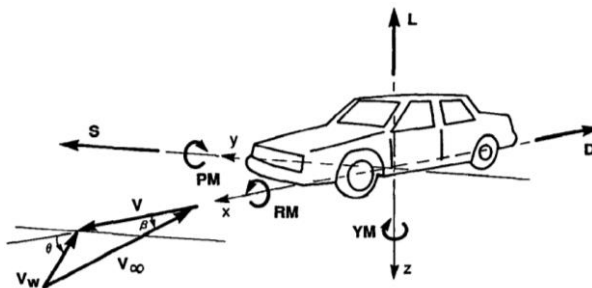
## 2.5 Gaya Aerodinamika

Adalah gaya-gaya yang diterima oleh satu bodi akibat fluida yang mengalir . Dengan adanya fluida yang mengalir maka mendapat gaya tekan dan geser. Akibatnya gaya-gaya tersebut membentuk resultan gaya yang disebut gaya aerodinamika. Penelitian aerodinamika yang selama ini telah dilakukan awalnya terpusat pada pengurangan drag, akan tetapi saat ini gaya-gaya lain seperti gaya angkat dan gaya samping juga menyumbang peranan terhadap stabilitas kendaraan.

Gaya aerodinamika yang terjadi pada mobil secara umum terdapat tiga, yaitu : gaya hambat (*drag force*) aerodinamik [ $F_D$ ], gaya angkat (*lift force*) aerodinamik [ $F_L$ ] dan gaya samping (*side force*) aerodinamik [ $F_S$ ]. Gaya-gaya tersebut bekerja pada titik yang disebut dengan "*Center of Pressure*" ( $C_p$ ) berada di luar titik pusat massa kendaraan ( $C_g$ ). Karena letak  $C_p$  dan  $C_g$  berbeda maka ketiga gaya di atas menimbulkan momen aerodinamis terhadap sumbu  $x, y, z$  yang berpusat pada  $C_g$  yaitu *Momen Rolling* ( $M_R$ ) pada sumbu  $x$ , *Moment Pitching* ( $M_P$ ) pada sumbu  $y$ , dan *Moment Yawing* ( $M_Y$ ) pada sumbu  $z$ . Besarnya gaya yang terjadi tersebut ( $F_D, F_L, F_S$ ), kecepatan angin ( $V_A$ ) dan sudut arah angin ( $\beta_A$ ) diperoleh melalui pengujian langsung model atau mobil aslinya pada terowongan angin (*wind tunnel*). Nilai besaran yang telah didapatkan dari terowongan angin selanjutnya dihitung untuk menghasilkan *Coeffisien of Drag* ( $C_D$ ), *Coeffisien of Lift* ( $C_L$ ) dan *Coeffisien of Side* ( $C_S$ ).

Gaya dan momen aerodinamika yang terdapat pada kendaraan diilustrasikan pada gambar 2.21, sedangkan koefisien gaya ( $F$ ) dan momennya ( $M$ ) didefinisikan melalui persamaan berikut ini.

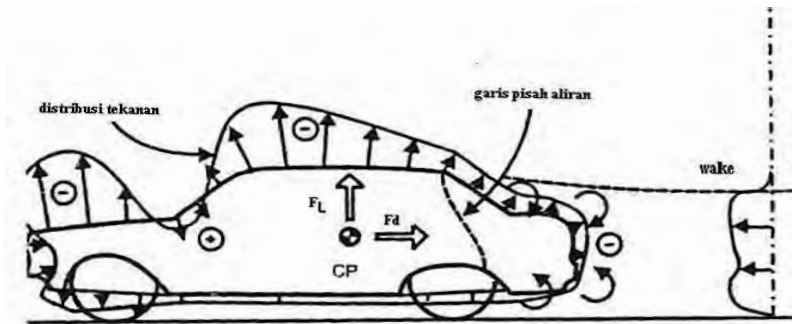
$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho v^2 Al} \dots\dots\dots(2.11)$$



Gambar 2.21 Gaya dan momen aerodinamik pada kendaraan  
(Hucho W.H – Sovran G , 1993)

## 2.6 Gaya Hambat (*Drag Force*) Aerodinamik

Gaya hambat (*drag*) adalah gaya yang bekerja menghambat pergerakan dalam arah horizontal (paralel terhadap aliran) dan berlawanan arah dengan arah gerak maju kendaraan. Besarnya gaya hambat (*drag*) untuk setiap bentuk kendaraan berbeda satu dengan yang lainnya, dan ini tergantung pada faktor koefisien *drag* atau  $C_D$ . selain itu juga dipengaruhi oleh luasan frontal dari kendaraan, dan tekanan dinamik. Gaya hambat total terdiri dari beberapa jenis gaya hambat (Scybor Rylski,1975) ,yaitu Hambatan bentuk yang disebabkan adanya gradien tekanan (*pressure drag*) dan gesekan (*friction drag*), Hambatan pusar yang disebabkan adanya perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah kendaraan yang membuat aliran udara berupa pusaran (*vortex*).



Gambar 2.22 Hambatan bentuk pada kendaraan  
(Sutantra N, 2001)

Adapun perumusan gaya hambat (*drag*) pada kendaraan adalah sebagai berikut:

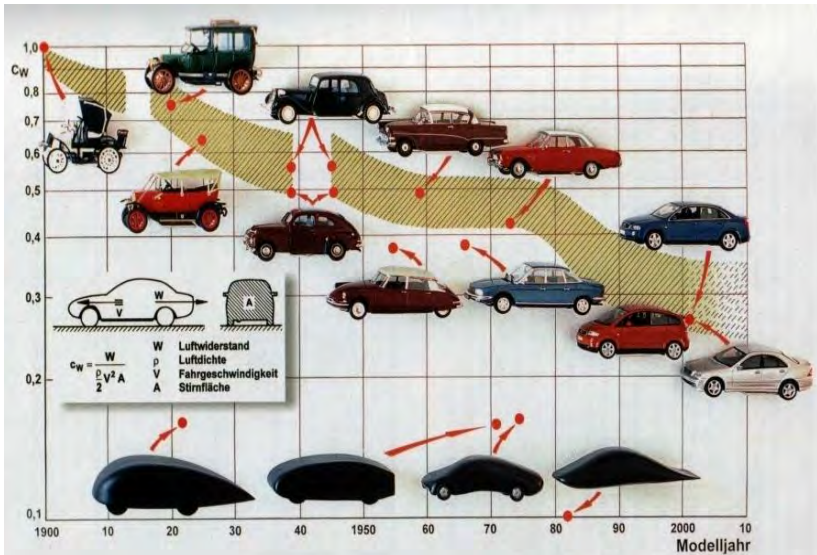
$$F_D = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot A_f$$

$$C_d = \frac{2 \cdot F_d}{\rho \cdot v^2 \cdot A_f} \dots \dots \dots (2.12)$$

(Sutantra N, 2001)

Dimana:  $C_d$  = koefisien gaya hambat  
 $A_f$  = Luas frontal kendaraan  
 $\rho$  = Densitas udara  
 $V$  = Kecepatan relatif angin terhadap kendaraan

Hubungan antara koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan luas frontal kendaraan ( $A$ ) disebut dengan faktor bentuk atau *shape factor*.

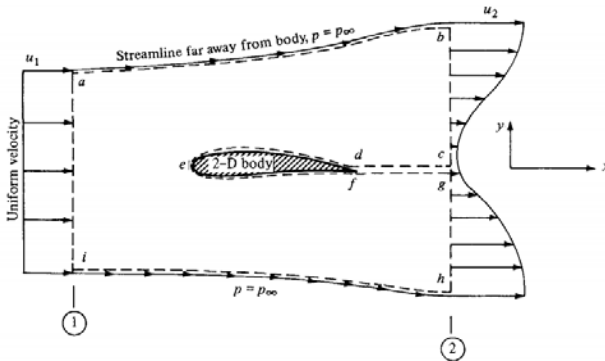


Gambar 2.23 Perubahan koefisien *drag* pada mobil  
**( Henze A & Schröder W , Automobiles )**

Pertimbangan untuk sebuah bodi dua dimensi di dalam suatu aliran, seperti pada gambar 2.24. *control volume* digambarkan di sekeliling bodi yang ditunjukkan dengan garis putus-putus. Control volume dibatasi oleh :

1. *Upper* dan *lower streamline* yang letaknya jauh di atas dan di bawah bodi (ab dan hi secara berturut-turut)
2. Garis yang tegak lurus terhadap kecepatan aliran yang letaknya jauh di muka (di depan) dan di belakang bodi (ai dan bh secara berturut-turut)

3. Potongan yang mengelilingi dan membungkus permukaan bodi (cdfg).



Gambar 2.24 *Control volume* untuk memperoleh drag pada bodi 2-Dimensi  
(Anderson John D. JR, 3<sup>rd</sup> Edition)

Keseluruhan *control volume* adalah garis terhubung antara titik *abcdefghia*. Lebar *control volume* pada *z-direction* (tegak lurus terhadap halaman ini) secara kesatuan. *Station 1* dan *2* adalah *inflow* dan *outflow station* secara berurutan.

Asumsikan kontur *abhi* cukup jauh dari bodi seperti halnya tekanan yang dimana pun besarnya sama dengan yang ada pada *abhi* dan jumlahkan terhadap tekanan *freestream*  $p = p_{\infty}$ . Asumsikan juga bahwa *velocity inflow*  $u_1$  adalah aliran *uniform* yang melewati *ai*. *Velocity outflow*  $u_2$  bukan aliran *uniform*, aliran ini melewati *bh*, karena adanya bodi membuat terbentuknya *wake* pada *outflow station*. Bagaimanapun asumsikan bahwa keduanya  $u_1$  dan  $u_2$  berada pada *x-direction* karena itu  $u_1 = \text{konstan}$  dan  $u_2 = f(y)$ .

Keseluruhan dari gaya-gaya permukaan pada *control volume*, berasal dari dua kontribusi yaitu:

1. Distribusi tekanan pada permukaan *abhi*.

$$- \iint_{abhi} p \cdot ds$$

2. Gaya permukaan pada *def* yang muncul karena keberadaan bodi.

Dari kedua pandangan di atas, maka total gaya permukaan yang bekerja pada keseluruhan *control volume* adalah,

$$\text{surface force} = - \iiint_{abhi} p.dS - R' \dots\dots\dots (2.13)$$

Persamaan tangan kanan adalah gaya yang bekerja pada aliran yang bergerak melalui *control volume*. Untuk *control volume* pada gambar 2.24 , gaya ini secara sederhana ditunjukkan oleh persamaan (2.14). Oleh karena persamaan tangan kanan diterapkan terhadap persamaan (2.14), sehingga

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho.V.dV + \iiint_S (\rho.V.dS)V = - \iiint_{abhi} p.dS - R' \dots\dots\dots (2.14)$$

Asumsikan kondisi *steady flow*, maka menjadi

$$R' = - \iiint_S (\rho V.dS)V - \iiint_{abhi} p.dS \dots\dots\dots (2.15)$$

Ingat bahwa kecepatan *inflow* dan *outflow*,  $u_1$  dan  $u_2$  berada pada *x-direction* dan komponen x dari  $R'$  adalah *drag* aerodinamik per unit span  $D'$ .

$$D' = - \iiint_S (\rho V.dS)u - \iiint_{abhi} (p.dS)_x \dots\dots\dots (2.16)$$

Untuk tekanan konstan,

$$\iiint_{abhi} (p.dS)u = 0 \dots\dots\dots (2.17)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.16) dan persamaan (2.17),

$$D' = - \iiint_S (\rho V.dS)u \dots\dots\dots (2.18)$$



Diketahui bahwa  $ai$  dan  $bh$  berorientasi pada  $y$ -direction. *Control volume* juga mempunyai kedalaman pada  $z$ -direction. Sehingga  $dS = dy$  (1). Persamaan integral pada (2.13) menjadi,

$$\oiint_S (\rho V \cdot dS) u = - \int_i^a \rho_1 u_1^2 dy + \int_h^b \rho_2 u_2^2 dy \dots \dots \dots (2.19)$$

Sebelum melangkah lebih jauh lagi, pertimbangkan kembali bentuk persamaan kontinuitas untuk aliran *steady*. Kemudian diterapkan pada *control volume* pada gambar 2.24, sehingga persamaan kontinuitas tersebut menjadi,

$$\begin{aligned} - \int_i^a \rho_1 u_1 dy + \int_h^b \rho_2 u_2 dy &= 0 \\ \int_i^a \rho_1 u_1 dy &= \int_h^b \rho_2 u_2 dy \dots \dots \dots (2.20) \end{aligned}$$

Persamaan (2.20) dikalikan dengan  $u_1$ ,

$$\int_i^a \rho_1 u_1^2 dy = \int_h^b \rho_2 u_2 u_1 dy \dots \dots \dots (2.21)$$

Substitusi persamaan (2.21) dengan persamaan (2.19),

$$\oiint_S (\rho V \cdot dS) u = - \int_h^b \rho_2 u_2 u_1 dy + \int_h^b \rho_2 u_2^2 dy$$

$$\text{Atau} \quad \oiint_S (\rho V \cdot dS) u = - \int_h^b \rho_2 u_2 (u_1 - u_2) dy \dots (2.22)$$

Substitusi persamaan (2.22) dengan persamaan (2.19),

$$D' = \int_h^b \rho_2 u_2 (u_1 - u_2) dy \dots \dots \dots (2.23)$$

Untuk aliran *incompressible*, diketahui bahwa  $\rho = \text{konstan}$ . Maka untuk kasus ini persamaan (2.23) menjadi,

$$D' = \rho \int_h^b u_2(u_1 - u_2) dy \dots\dots\dots (2.24)$$

(Anderson John D. JR, 3<sup>rd</sup> Edition)

Gaya aerodinamik *drag* selain bergantung pada koefisien *drag* dan hubungannya seperti rumusnya di atas, itu masih juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti sifat turbulensi aliran dan bilangan *reynold*. Ketergantungan pada bilangan *reynold* ini mempunyai arti bahwa koefisien *drag* bervariasi sesuai dengan kecepatan. Tetapi pengaruh ini menjadi tidak signifikan apabila kecepatan kendaraan telah melewati kecepatan normal *cruising*. Hanya dalam pengujian model kendaraan yang dilakukan di terowongan angin atau *wind tunnel*, faktor bilangan *reynold* menjadi sangat penting.

Gaya hambat atau *drag force* yang terjadi pada kendaraan menurut **Barnard (1996)** sumbernya berasal dari *surface friction drag*, *pressure drag* atau *form drag*, *trailing vortex drag*, *extrencencedrag*, *drag* karena roda, dan *drag* karena sistem pendingin. Namun pada analisa gaya *drag* sudut pandang 2 dimensi *drag* karena roda, dan *drag* karena sistem pendingin diabaikan. Hal ini diakibatkan bentuk model uji yang minim dan tidak adanya peralatan tersebut.

**a) Surface friction drag**

Pengaruh *surface friction drag* terhadap koefisien *drag* relatif kecil. Menurut **Barnard(1996)** yang mengutip dari hasil penelitian **Carr (1983)** bahwa besarnya sekitar 0,04 dari harga  $C_D$  keseluruhan untuk profil yang halus, dan sekitar 0,11 untuk profil yang kasar.

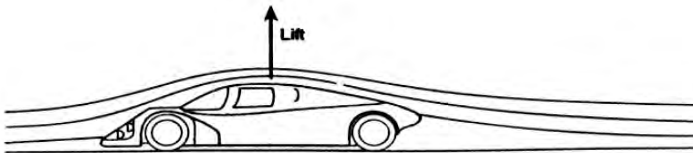
**b) Pressure atau form drag**

Aerodinamik *drag* pada kendaraan sebagian besar disebabkan oleh perbedaan tekanan yang terjadi antara permukaan bagian belakang yang rata-rata lebih rendah dari permukaan bagian depan. Distribusi tekanan yang terjadi disekeliling kendaraan dipengaruhi oleh interaksi beberapa

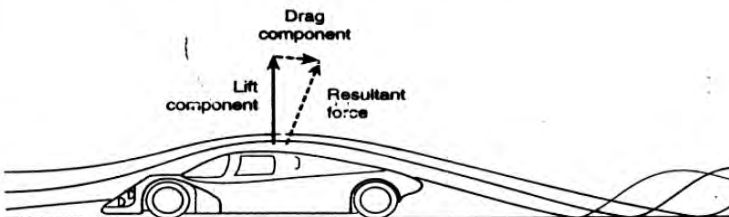
faktor, yang terutama adalah lapisan batas atau *boundary layer*.

**c) *Trailing vortex drag***

Aliran yang mengalir pada suatu kendaraan sebenarnya adalah tiga dimensi. Konsekuensinya terjadi tekanan yang rendah pada permukaan bagian atas dibandingkan dengan bagian bawah. Akibatnya timbul gaya angkat atau *lift force*. Selain itu udara cenderung mengalir dari sisi bawah yang bertekanan tinggi ke bagian atas yang bertekanan rendah, sehingga timbul *vortices* pada daerah *wake*. *Vortices* ini disebut dengan *trailing vortices*. Terbentuknya *trailing vortices* menghabiskan momentum aliran yang cukup besar sehingga ini juga merupakan sumber dari *drag*. Gambar di bawah ini menunjukkan bentuk aliran udarayang melewati bodi mobil dengan *ground effect yang terjadi* untuk aliran dua dimensi dan aliran tiga dimensi.

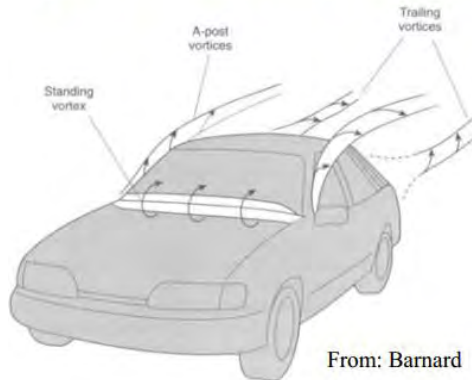


(a) Flow patterns without the effect of trailing vortices



(b) Real flow patterns with the effect of trailing vortices

## Vortex Structure Detail



From: Barnard

Gambar 2.25 Bentuk *trailing vortex* pada aliran melewati bodi mobil dengan *ground effect* sudut pandang 2D maupun 3D (Barnard R.H, 1996)

Dari gambar di atas tampak pada aliran tiga dimensi *vortice* menarik udara di belakang kendaraan sehingga menciptakan tekanan yang rendah disana dan akibatnya aliran tertarik ke bawah. Karena udara berpusar dengan kecepatan yang tinggi, maka sesuai dengan persamaan Bernoulli tekanan pada *vortex* rendah. Dengan berkurangnya tekanan pada bagian belakang kendaraan maka akan memperbesar beda tekanan yang terjadi antara di depan dan belakang kendaraan yang akhirnya akan menaikkan *drag*.

Pada proses terjadinya pusaran atau *vortice* ini banyak energi yang terpakai, sehingga hal ini juga merupakan sumber *drag*.

### d) *Extrencence drag*

Banyaknya bagian yang menonjol yang terdapat pada permukaan kendaraan sehingga membentuk celah, seperti kaca spion, dapat menyebabkan terjadinya separasi lokal yang akhirnya juga menimbulkan aliran *vortice*. Akibatnya dapat menghasilkan *drag*. Selain itu *drag* dapat juga terjadi karena

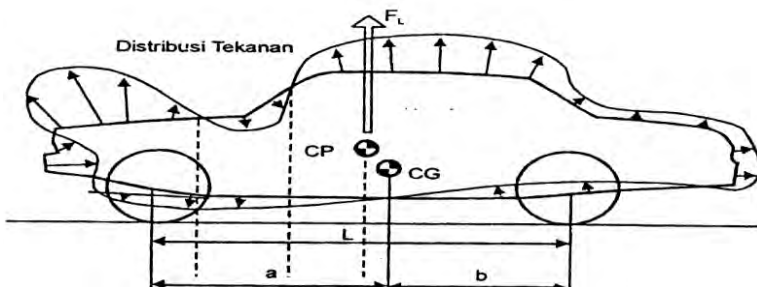
bagian yang menonjol tersebut dapat mempengaruhi transisi dari lapisan batas, sehingga timbulnya separasi pada aliran utama.

## 2.7 Gaya Lift (Gaya Angkat)

*Lift* merupakan faktor penting dalam aerodinamika kendaraan ,karena *lift* mempunyai pengaruh besar terhadap stabilitas, kemantapan berjalan atau *road holding* dan unjuk kerja atau performance kendaraan itu sendiri. Menurut **Barnard** , faktor yang sangat berpengaruh terhadap terjadinya gaya *lift* pada *road vehicle* adalah jarak dengan jalan (*ground clearance*).

Perbedaan bentuk antara permukaan atas dan bagian bawah kendaraan menyebabkan aliran udara pada permukaan atas lebih cepat daripada aliran udara pada permukaan bawah, sehingga tekanan pada permukaan atas kendaraan lebih rendah daripada tekanan permukaan bawah.

Faktor lain adalah kekasaran bagian permukaan bawah kendaraan yang disebabkan oleh profil mesin dan komponen lain yang memperlambat aliran di bawah sehingga memperbesar tekanan aliran permukaan bawah. Karena itu tekanan yang bekerja pada bagian bawah kendaraan secara umum lebih besar dari tekanan yang bekerja pada bagian atas kendaraan sehingga menimbulkan terbentuknya gaya angkat karena adanya desakan aliran udara dari permukaan bawah ke permukaan atas kendaraan.



Gambar 2.26 Distribusi tekanan penyebab gaya angkat (*lift force*)  
(Sutantra N, 2001)

Gaya ini bekerja dalam arah vertikal dan biasanya arah ke atas ditandai sebagai arah positif dan ke bawah sebagai arah negatif. Gaya *lift* secara total dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot A_f$$

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot V_a^2 \cdot A_f} \dots\dots\dots (2.25)$$

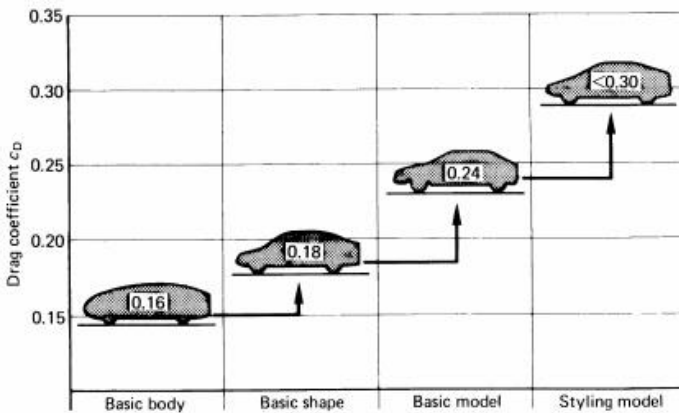
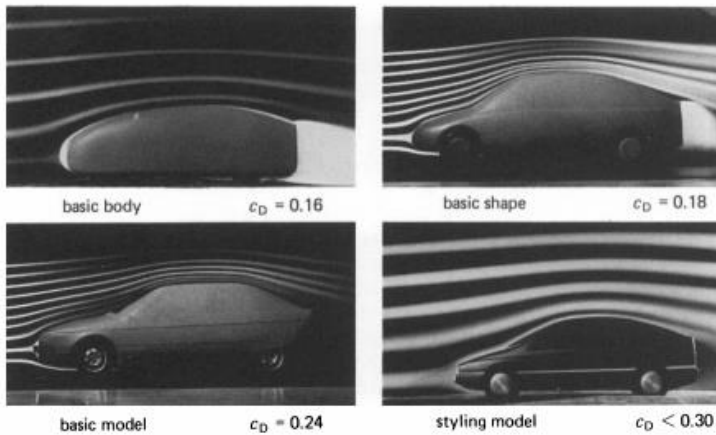
(Sutantra N, 2001)

Dimana:  $C_L$  = koefisien gaya angkat.

## 2.8 Pengaruh Bentuk Bodi

Banyak problema di dalam bidang aerodinamika yang tidak bisa diselesaikan hanya dengan perhitungan analitis dan matematis saja tetapi harus menggunakan berbagai macam eksperimen untuk membantu memecahkan permasalahan dan menunjang teori dasar yang telah ada. Dari hasil eksperimen dapat diambil suatu kesimpulan yang nantinya berguna untuk memecahkan problema aerodinamika. Analisa yang dilakukan oleh berbagai ahli aerodinamika terhadap bentuk bodi kendaraan dilakukan dengan melakukan riset pengujian terhadap berbagai macam komponen bodi kendaraan dan pengaruhnya terhadap beban angin.

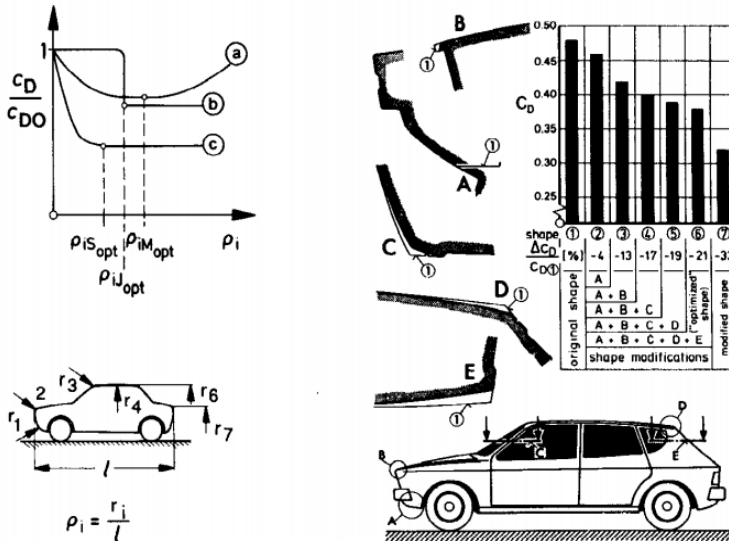
Pada dasarnya proses perancangan bentuk bodi kendaraan dapat dibagi dalam 5 tahap yaitu *basic body*, *basic shape*, *basic model*, *styling model*, dan tahap akhir yaitu *production car*.



Gambar 2.27 Tahap Perancangan bodi kendaraan dan pengaruhnya terhadap gaya hambat.  
(Wolf- Hucho , 1987)

Dari tahun ke tahun model kendaraan mengarah pada penurunan koefisien hambatan aerodinamika ( $C_D$ ) dan tentunya juga tidak mengurangi keindahan dari kendaraan. Beberapa penelitian mengatakan bahwa untuk mengurangi *drag force* langkah yang dilakukan yaitu mendesain bodi agar “*streamline*” (memperkecil koefisien *drag*,  $C_d$ ) dan mengurangi luas kontak tegak lurus arah

aliran fluida/ laju kendaraan. Berikut merupakan contoh hasil penelitian yang memfokuskan pada pengurangan  $C_d$  pada seluruh body kendaraan.



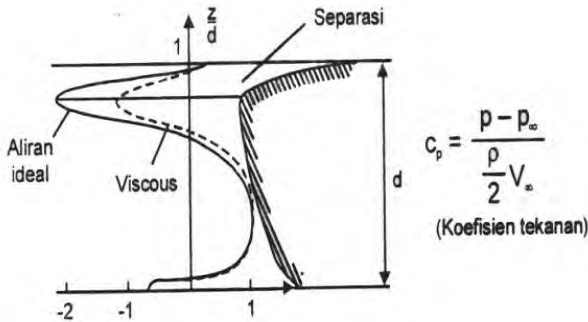
Gambar 2.28 Penelitian terhadap pengurangan luasan *frontal* body mobil  
(Hucho W.H – Sovran G , 1993)

## 2.9 Pengaruh Bentuk Komponen Bodi

### a. Bagian Depan Bodi (*Forebody*)

Bagian depan kendaraan merupakan hidung/moncong kendaraan yang terdiri dari kap mesin (*hood*), *windscreen* beserta perlengkapan panel depan. Separasi yang terdapat pada hidung kendaraan dapat terjadi pada bagian ujung depan kap mesin kendaraan. Gambar berikut menunjukkan separasi kecil (pemancaran angin) yang terjadi pada ujung kap mesin kendaraan.

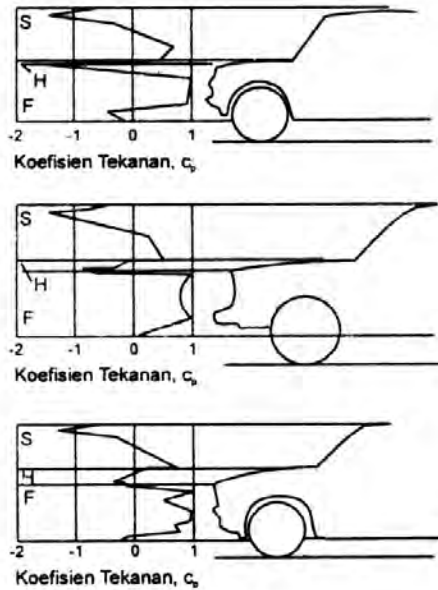




Gambar 2.29 Aliran separasi pada kap mobil  
(Sutantra N, 2001)

Dari grafik distribusi tekanan dapat dilihat bahwa pada kondisi aliran angin yang sebenarnya (*actual flow*), titik puncak pengisapan pada ujung kap mobil lebih rendah dibandingkan pada aliran ideal (*inviscid flow*). Begitu juga tekanan di atas titik stagnasi sedikit lebih besar dibandingkan tekanan pada aliran *inviscid*. Pada titik stagnasi sendiri  $C_p = 1$  pada kedua kondisi aliran di atas. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa kekuatan yang menekan bagian depan mobil dalam aliran yang sebenarnya (*viscous flow*) lebih besar dibandingkan dalam aliran ideal (*inviscid flow*).

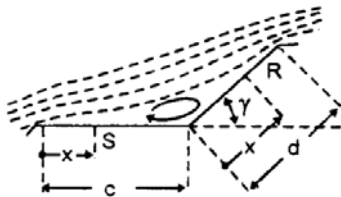
Distribusi tekanan yang mengenai bagian depan mobil berbeda-beda tergantung bentuk depan kendaraan tersebut. Gambar berikut menunjukkan grafik distribusi tekanan untuk berbagai bentuk *forebody* mobil.



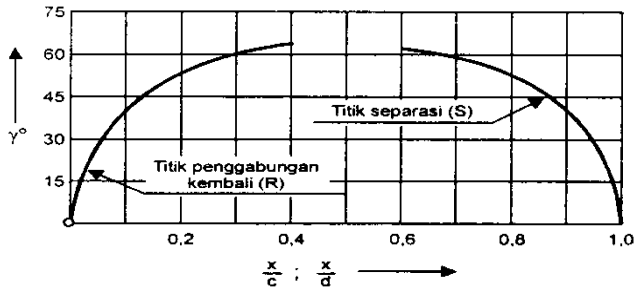
Gambar 2.30 Grafik distribusi tekanan pada *forebody* mobil.  
(Sutantra N, 2001)

b. Pilar Kaca (*Windshield*)

Separasi aliran yang terjadi pada kaca depan disebabkan oleh sudut *windscreen* yang terlalu besar. Separasi terjadi pada kap mesin aliran akan menyatu kembali pada kaca. Fenomena ini telah ditemukan oleh **Scybor Rylski**.



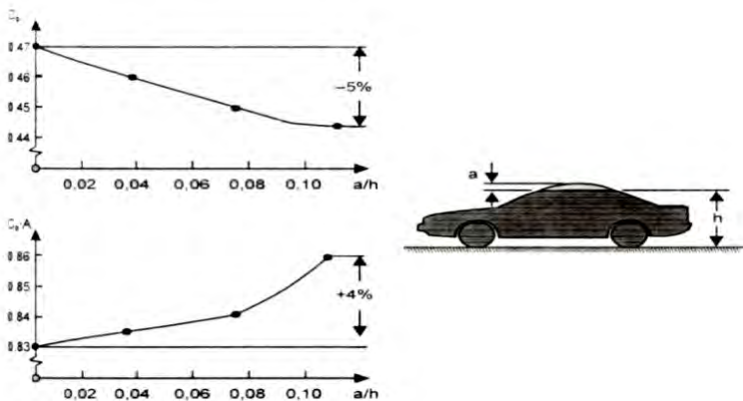
Gambar 2.31 Separasi pada kap  
(Sutantra, N, 2001)



Gambar 2.32 Penyatuan aliran pada kaca.  
(Sutantra, N, 2001)

### c. Bagian Atap Kendaraan

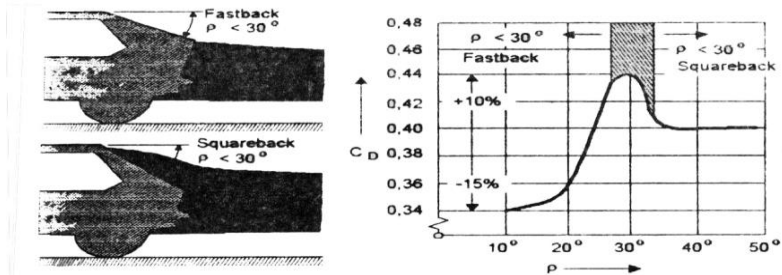
Perbaikan pada bagian atap dari kendaraan dapat dilakukan dengan mendesain atap dengan bentuk *konvex* agar memudahkan aliran udara mengalir ke belakang. Jika koveksitas diperbesar, *drag* koefisien dapat diperkecil. Jika bentuk *konvex* didesain sehingga menyebabkan pertambahan luas *frontal* area, maka aerodinamik *drag* juga meningkat. Jika tinggi atap asli dibiarkan konstan maka kaca depan dan belakang harus dibuat melengkung menuju *contour* sehingga efek konveksitas dapat tercapai.



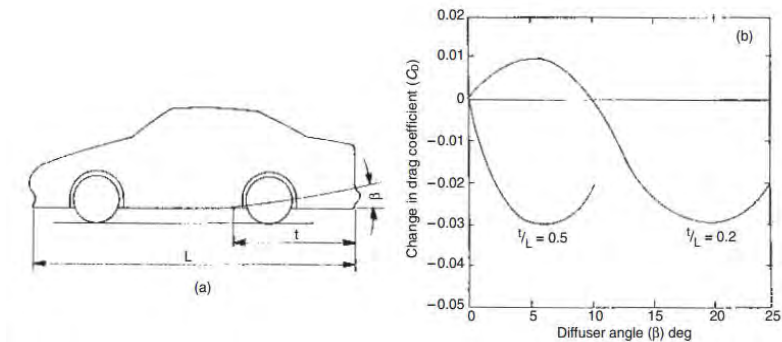
Gambar 2.33 Pengaruh konveksitas pada koefisien *drag*  
(Sutantra N, 2001)

#### d. Bagian Belakang Kendaraan

Reduksi *drag* juga bisa dilakukan dengan menganalisa kemiringan bentuk bagian belakang. Pada bagian belakang yang mempunyai kemiringan antara 15 derajat sampai dengan 35 derajat besarnya *drag* dan *lift* sangat bervariasi karena adanya pengaruh *vortex* yang cukup besar pada kemiringan tersebut.



(a)



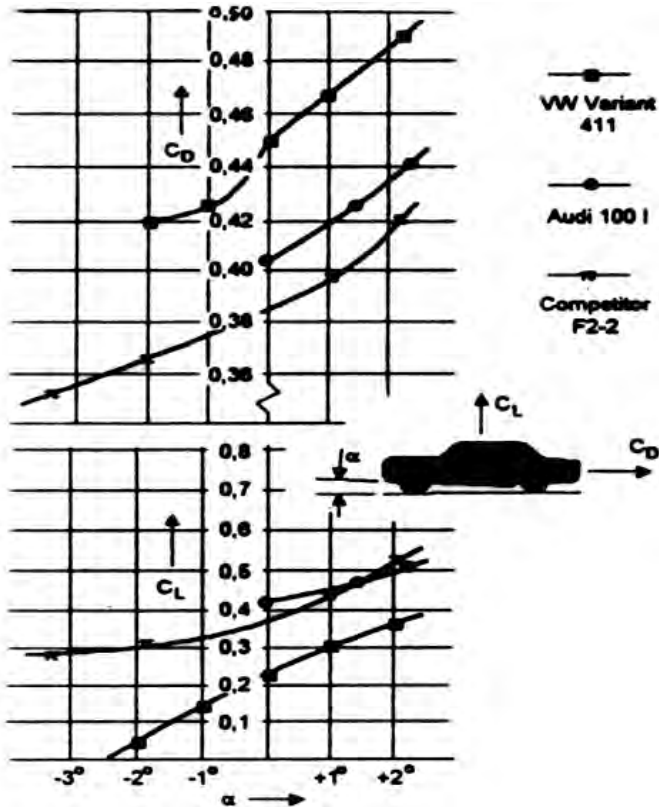
(b)

Gambar 2.34 (a) Tipikal *Flow* yang terjadi pada bodi *Streamline*  
(b) Pengaruh kemiringan bagian belakang (*rear end / difusser*) terhadap *drag*.

(Butterworth Heinemann, 2002; Heisler, Heinz 2<sup>nd</sup> edition, 2002)

e. Bagian Bawah Kendaraan

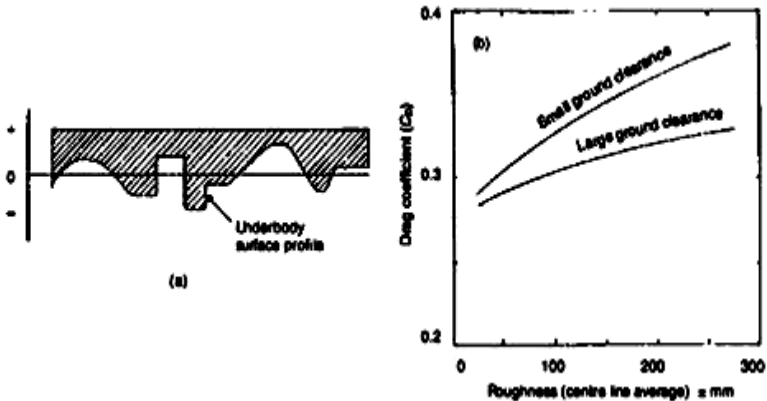
Kekasaran bagian bawah kendaraan juga akan meningkatkan nilai *drag* pada kendaraan. Reduksi *drag* dapat dilakukan dengan memperhalus bagian bawah kendaraan. Kemiringan bagian bawah kendaraan ( $\alpha$ ) juga dapat mempengaruhi koefisien hambat dan koefisien angkat.



Gambar 2.35 Pengaruh kemiringan  $\alpha$  terhadap  $C_D$  dan  $C_L$ .  
(Sutantra N, 2001)

Berdasarkan referensi dari penelitian lain yang sudah dilakukan, harga  $C_D$  maupun  $C_L$  juga dipengaruhi oleh *contour*

dari bagian bawah mobil. Untuk lebih jelasnya akan diperlihatkan pada gambar berikut:

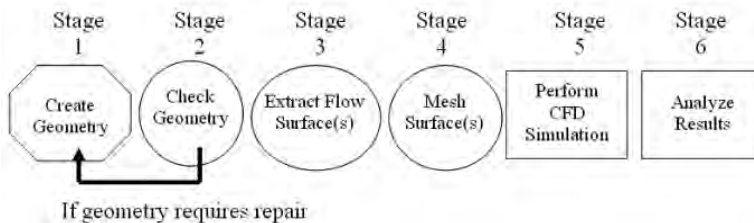


Gambar 2.36 Pengaruh Kekasaran daerah *Underbody* Terhadap Koefisien *Drag*.  
(Butterworth Heinemann, 2002)

Pada penelitian diatas dijelaskan bahwa pada gaya *drag* terdapat dua komponen gaya yaitu *shear surface stress (friction drag)* dan *pressure drag*. Kecenderungan yang terjadi pada bodi kendaraan yang semakin kasar ialah semakin besarnya *friction drag*. Ini berarti memicu terjadinya titik separasi lebih awal sehingga terbentuk daerah *wake*. Karena adanya daerah ini gaya *drag* yang terjadi semakin besar karena adanya perbedaan tekanan yang besar antara daerah muka bodi dengan buritan sehingga adanya tekanan balik (*adverse pressure*) sehingga timbul komponen gaya *drag* yang kedua yaitu *pressure drag*. Semakin luas daerah *wake* ini maka *pressure drag* akan semakin meningkat. Berdasarkan penelitian, kekasaran permukaan yang memberikan efek signifikan terhadap timbulnya gaya *drag* ialah pada daerah *underbody*. Oleh karena itu, kekasaran pada daerah tersebut haruslah diminimalisir sampai dengan dengan ukuran tertentu.

## 2.10 Dinamika Aliran Fluida secara Komputasi (*Computational Fluid Dynamics*)

*Computational fluid dynamics* (CFD) adalah ilmu perangkat analisa system yang memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, *momentum*, perpindahan massa, benda-benda bergerak, aliran multifasa, reaksi kimia, sistem akustik hanya dengan pemodelan di komputer. Dengan menggunakan salah satu *software CFD* dapat dibuat *virtual prototype* dari sebuah sistem atau alat yang ingin dianalisis dengan menerapkan kondisi nyata di lapangan. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, suhu, kecepatan, dan laju alir massa (*mass flow rate*). Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *preprocessing* (spesifikasi geometri, pemilihan *turbulence model*, spesifikasi *parameter* dan *grid generation*) kemudian *postprocessing* (*visualization* dan *treatment data*). Prosedur CFD melalui tahapan seperti diagram pada gambar 2.38



Gambar 2.37 Blok diagram simulasi dengan *CFD*  
(Nashruddin, A. Haidar, 2012)

*Software CFD* akan memberikan data-data, gambar-gambar, atau kurva-kurva yang menunjukkan prediksi dari performansi keandalan sistem yang telah didesain tersebut. Hasil analisis CFD bisa menyajikan prediksi kualitatif dan kuantitatif dari berbagai persoalan dinamika fluida. CFD memprediksi aliran

berdasarkan model matematika (persamaan diferensial parsial), metode numerik dan tools perangkat lunak.

### **2.10.1 *GAMBIT (Geometry and Mesh Building Intelligent Toolkit)***

*Gambit* merupakan salah satu preprocessor yang didesain untuk membantu model dan melakukan diskritisasi (meshing) pada analisa CFD. Versi *Gambit* yang digunakan adalah *gambit 2.4.6. Software* gambit ini dapat membuat geometri dan membuat *meshing* untuk berbagai macam bentuk, termasuk bentuk-bentuk yang rumit dan tidak beraturan. Pembuatan geometri yang digunakan dalam *software* ini adalah koordinat (x,y). *Meshing* merupakan proses selanjutnya setelah menggambar geometri dimana *meshing* dapat dilakukan dengan berbagai macam bentuk *mesh*, yaitu *mesh* heksahedral terstruktur dan tidak terstruktur, tetrahedral, piramid, dan prisma. Selain itu, pada *software Gambit* ini juga dapat dilakukan pengecekan kualitas *mesh* sesuai dengan standar yang kita inginkan. Semakin kecil kualitas *meshing* yang dibuat maka semakin akurat data yang di peroleh. Tahap pemodelan terakhir pada *Gambit* adalah proses penentuan jenis kondisi batas. *Mesh* yang telah dibuat pada *Gambit* dapat diekspor ke semua *solver Fluent*. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Gambit 2.4.6*.

### **2.10.2 *FLUENT***

*Fluent* adalah satu jenis program CFD yang menggunakan metode volume hingga (*finite volume*). *Fluent* menyediakan fleksibilitas *mesh* yang lengkap, sehingga dapat menyelesaikan kasus aliran fluida dengan *mesh (grid)* yang tidak terstruktur sekalipun dengan cara yang relatif mudah. Jenis *mesh* yang didukung oleh *Fluent* adalah tipe 2D (*two dimension*) *triangular-quadrilaterall*, 3D (*three-dimension*) *tetrahedral-hexahedral-pyramid-wedge*, dan *mesh* campuran (*hybrid*). *Fluent* juga memungkinkan penggunaanya untuk memperhalus atau memperbesar *mesh* yang sudah ada. Beberapa kelebihan *Fluent* yaitu mudah untuk digunakan, model yang realistik (tersedia berbagai pilihan *solver*), diskritisasi atau *meshing* model yang



efisien (dalam *Gambit*), cepat dalam penyajian hasil (bisa dengan paralel komputer), dan visualisasi yang mudah untuk dimengerti. Aplikasi *Fluent* di dalam dunia industri, sering digunakan untuk desain dari suatu sistem fluida, dan juga untuk mencari sumber atau analisis kegagalan suatu sistem fluida. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Fluent 6.3.26*.

#### **2.10.2.1. *Grid Independensi***

Dari penelitian terdahulu agar melakukan *CFD* simulasi dengan sukses perlu memperhatikan *grid* independensi. Salah satu cara agar dapat menguji *grid* independensi adalah dengan melakukan *adapt*. *Grid* independensi sendiri adalah solusi yang konvergen yang ditentukan dari perhitungan *CFD* yang tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya *grid*. Apabila dengan meningkatkan jumlah dari sel maka kemungkinan tidak akan mengubah *flow-field solution* dan *integrated quantities*. Didalam prakteknya *grid* independensi diindikasikan dengan menghaluskan *mesh* sehingga hal tersebut dapat mengubah solusi numerik. Oleh karena itu dengan *adapt* dapat kita ketahui beberapa bagian *mesh* saja yang harus lebih dihaluskan agar tidak mengubah solusi numerik.

#### **2.10.2.2. *Formulasi Solver***

Di dalam *Fluent* tersedia tiga formulasi *solver*, yaitu *segregated*, *coupled implicit*, dan *coupled eksplisit*. Ketiga formulasi tersebut menghasilkan solusi yang akurat untuk berbagai jenis kasus, tetapi pada beberapa kasus tertentu salah satu formulasi mungkin dapat menghasilkan solusi yang lebih cepat daripada yang lain.

Formulasi *solver segregated* menyelesaikan persamaan-persamaan pada suatu kasus secara bertahap, sedangkan pada *solver coupled* menyelesaikan semua persamaan secara bersamaan. Kedua formulasi *solver* tersebut menyelesaikan persamaan untuk besaran-besaran tambahan (misalnya, radiasi, turbulensi) secara bertahap. *Solver coupled* implisit dan eksplisit mempunyai perbedaan pada cara melinierkan persamaan-persamaan yang akan diselesaikan.

Secara umum, *solver segregated* banyak digunakan untuk kasus dengan fluida inkompresibel dan kompresibel dengan kecepatan aliran rendah sampai menengah (bilangan  $Mach < 1$ ). Adapun *solver coupled* pada dasarnya didesain untuk kasus fluida kompresibel dengan kecepatan tinggi (bilangan  $Mach \geq 1$ ).

### 2.10.2.3. Penentuan Model

Pada *Fluent* terdapat beberapa model dan persamaan dasar yang dapat dipilih sesuai dengan kasus yang akan dianalisis. Persamaan-persamaan tersebut meliputi model multifasa, persamaan energi, model viskos, model spesies transport dan reaksi, model fasa diskrit, model pembekuan dan peleburan, dan model akustik. Pada topik kali ini akan dibahas lebih lanjut mengenai persamaan energi dan model viskos.

Secara garis besar, model *turbulen* dapat didekati dengan dua pendekatan, yaitu berdasarkan *Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)* dan berdasarkan *Large Eddy Simulation (LES)*. Sebelum menentukan model viskos, harus ditentukan terlebih dahulu apakah aliran fluida yang akan disimulasikan termasuk dalam aliran *laminar* atau *turbulen* dengan menghitung bilangan *Reynolds* terlebih dahulu. Apabila termasuk aliran *turbulen*, maka *Fluent* menyediakan beberapa model turbulensi, yaitu model *Spalart - Allmaras*, model *k-epsilon* ( $k - \epsilon$ ) *Standard*,  $k - \epsilon$  *Renormalization group* ( $k - \epsilon$  *RNG*),  $k - \epsilon$  *Realizable*, model  $k - \omega$  *Standard*,  $k - \omega$  *Shear Stress Transport (SST)*, model *Reynolds stress (RSM)*, dan model *Large Eddy Simulation (LES)* khusus 3D.

Dari pemodelan-pemodelan tersebut, pemodelan turbulensi yang baik dalam memprediksi tekanan statis dinding adalah pemodelan  $k - \epsilon$  *realizable*. Hal ini dikarenakan *error* yang terjadi pada model tersebut adalah paling kecil, sehingga dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan pemodelan lain untuk mendeskripsikan tekanan statis. Model *k-epsilon realizable* merupakan pengembangan model yang relatif baru dan berbeda dengan model *k-epsilon* dalam dua hal, yaitu:

- Pada model *k-epsilon realizable* terdapat formulasi baru untuk memodelkan viskositas *turbulen*.

- Sebuah persamaan untuk *epsilon* telah diturunkan dari persamaan untuk menghitung fluktuasi vortisitas rata-rata.

Istilah *realizable* mempunyai arti bahwa model tersebut memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan *Reynolds*, konsisten dengan bentuk fisik aliran *turbulen*. Kelebihan dari model *k-epsilon realizable* adalah lebih akurat untuk memprediksikan laju penyebaran fluida dari pancaran jet/nozel. Model ini juga memberikan performa yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi. Salah satu keterbatasan model *k-epsilon realizable* ialah terbentuknya viskositas *turbulen* non fisik pada kasus dimana domain perhitungan mengandung zona fluida yang diam dan berputar (*multiple reference frame, sliding mesh*).

#### 2.10.2.4. Penentuan Kondisi Batas

Untuk mendefinisikan suatu kasus, harus dimasukkan informasi pada variabel aliran pada domain kasus tersebut, antara lain fluks massa, momentum, energi, dan lain-lain. Informasi tersebut salah satunya harus dimasukkan dalam kondisi batas (*boundary condition*). Penentuan kondisi batas melibatkan beberapa hal, yaitu:

- mengidentifikasi lokasi kondisi batas, misalnya sisi masuk, sisi keluar, dinding, dan lain-lain;
- memasukkan informasi/data pada batas yang telah ditentukan.

Data yang diperlukan (input) pada kondisi batas merupakan data yang sudah diketahui atau data yang dapat diasumsikan. Tetapi asumsi data tersebut harus diperkirakan mendekati yang sebenarnya. *Input* data yang salah pada kondisi batas akan sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi. Kondisi batas yang terdapat pada *Fluent* sebagai berikut:

- Umum: *pressure inlet, pressure outlet*
- Aliran inkompresibel: *velocity inlet, outflow*
- Aliran kompresibel: *mass flow inlet, pressure far-field*
- Spesial: *inlet vent, outlet vent, intake fan, exhaust fan*

- Sisi ganda (*doublesided*): *fan, interior, porous jump, radiator*
- Lain-lain: *wall, symmetry, periodic, axis*

Pada pembahasan kali ini akan dibahas lebih lanjut mengenai *velocity inlet, outflow, dan wall*.

#### **a) *Velocity Inlet***

Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran inkompresibel. Metode spesifikasi kecepatan yang ada pada kondisi batas ini adalah:

- Komponen (*Components*)
- Besar/nilai kecepatan, tegak lurus terhadap batas (*Magnitude, normal to boundary*)
- Besar/nilai kecepatan dan arah (*Magnitude & direction*)

#### **b) *Outflow***

Kondisi batas ini digunakan apabila data aliran pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali atau dapat diabaikan. Data pada sisi keluar diekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar. tidak perlu dimasukkan data apapun pada kondisi batas ini. Keterbatasan kondisi batas *outflow* adalah:

- Hanya dapat dipakai jika aliran pada sisi keluar adalah aliran berkembang penuh (*fully developed*).
- Hanya dapat dipakai untuk aliran inkompresibel.
- Tidak dapat digunakan bersamaan dengan kondisi batas *pressure inlet*, harus menggunakan kondisi batas *velocity inlet* pada sisi masuk.
- Tidak dapat digunakan untuk aliran transien dan massa jenis yang tidak konstan sepanjang aliran.
- Tidak dapat digunakan untuk kasus yang mengalami aliran balik pada sisi keluarnya, karena persamaan yang digunakan untuk mengekstrapolasi data pada aliran mengasumsikan aliran yang terjadi

pada sisi keluar adalah aliran berkembang penuh yang tidak mungkin terjadi aliran balik. Oleh karena itu apabila hendak dipakai kondisi batas *outflow*, harus dipastikan terlebih dahulu bahwa lokasi kondisi batas tersebut telah berada pada daerah aliran berkembang penuh.

c) *Wall*

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan. Pada aliran viskos, kondisi *no slip* yang terjadi pada dinding sebagai berikut:

- Kecepatan tangensial fluida pada dinding sama dengan kecepatan dinding, jadi apabila dindingnya tidak bergerak maka kecepatan tangensial fluida pada dinding sama dengan nol.
- Komponen arah normal kecepatan fluida pada dinding sama dengan nol.
- Tegangan geser yang terjadi antara dinding dan fluida dapat ditentukan.

Apabila persamaan energi diaktifkan, maka pada dinding terdapat beberapa tipe fungsi kondisi termal antara lain *heatflux*, temperatur, konveksi, dan radiasi. Kekasaran permukaan dinding dapat ditentukan apabila menggunakan model viskos *turbulen*. Dinding juga dapat dibuat bergerak secara translasi atau berputar dengan menentukan kecepatan putar atau translasi dinding.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dikarenakan keterbatasan alat ukur dan visualisasi karakteristik aliran melintasi bodi mobil *Basudewo* maka penelitian ini menggunakan metode numerik dengan *software Fluent 6.3.26*. Pada metode numerik ini ada tiga tahapan utama yang harus dilakukan, antara lain: *preprocessing*, *solving* atau *processing* dan *postprocessing*. Dan disertakan tampilan 2D tampak samping dan tampak atas dari mobil *Basudewo*.

### 3.1 *Preprocessing*

*Preprocessing* merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (*CFD*). Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan.

#### 3.1.1 Geometri Mobil *Basudewo EV*

Pembuatan geometri mobil *Basudewo* ini menggunakan *software SolidWorks*. Adapun geometri dan dimensi dari mobil *Basudewo EV* yang telah dirancang dapat dilihat pada tabel dan gambar dibawah ini:

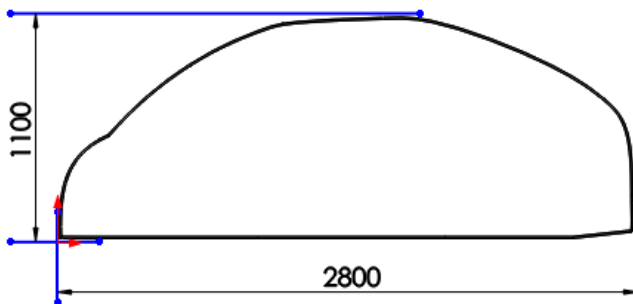
*Tabel 3.1 Dimensi bodi mobil Basudewo*

Parameter	Dimensi (mm)
l	2800
w	1300
h	1100

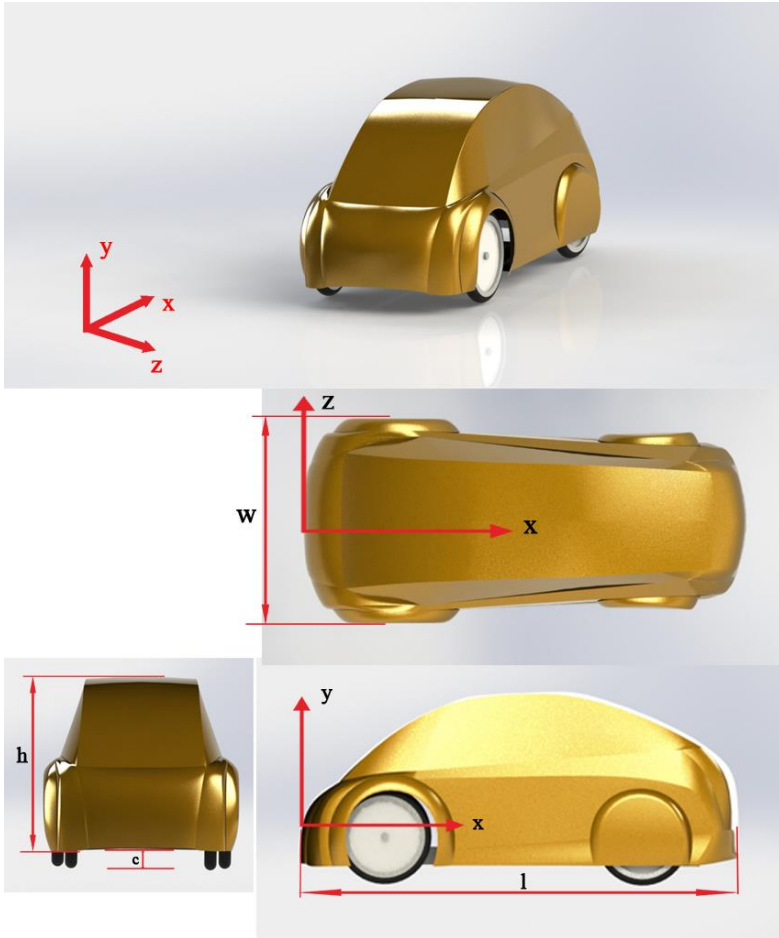


Gambar 3.1 *Basudewo EV*

- a. Pembuatan Geometri Mobil *Basudewo* 3D
  1. Menggambar *geometry* bodi mobil *Basudewo EV*.



Gambar 3.2 Geometri 2D bodi *Basudewo EV*.

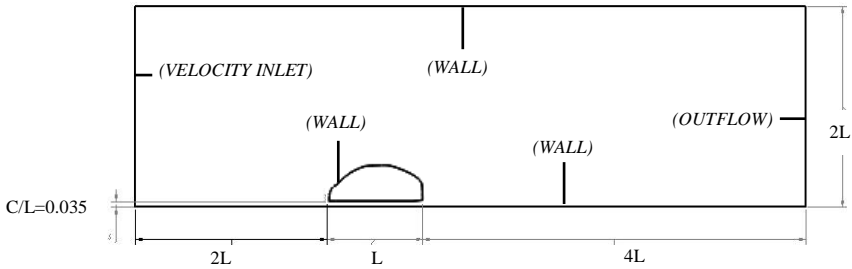


Gambar 3.3 Geometri bodi mobil *Basudewo* tampak *asimetric*, tampak atas, tampak depan, dan tampak samping

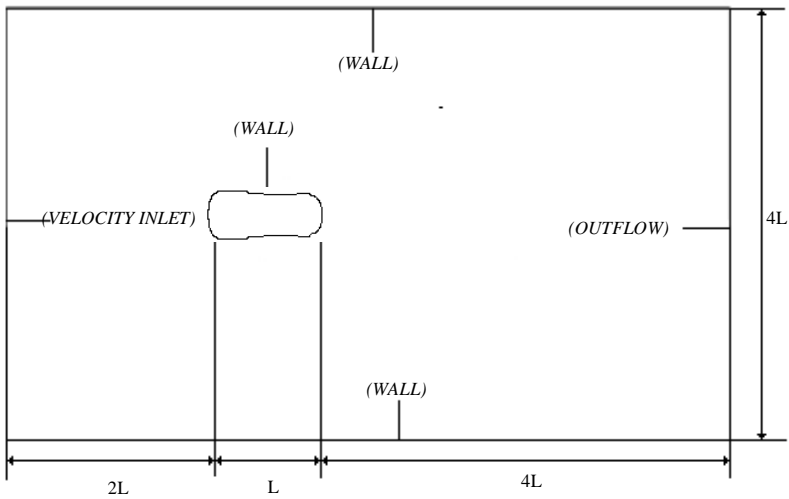
### 3.1.2 Domain Pemodelan

Penentuan dimensi domain merujuk pada penelitian berbasis *vehicle aerodynamics* yang dilakukan oleh **Damjanović** dalam pemodelan numerik yang nantinya menjadi batasan pada *software Fluent 6.3.26*. berikut adalah gambar domain yang digunakan untuk pemodelan:





Gambar 3.4 *Domain* Pemodelan Bodi Tampak samping  
(2D *flow*)  
(Damjanović, 2010)



Gambar 3.5 *Domain* Pemodelan Bodi Tampak Atas  
(2D *flow*)  
(Damjanović, 2010)

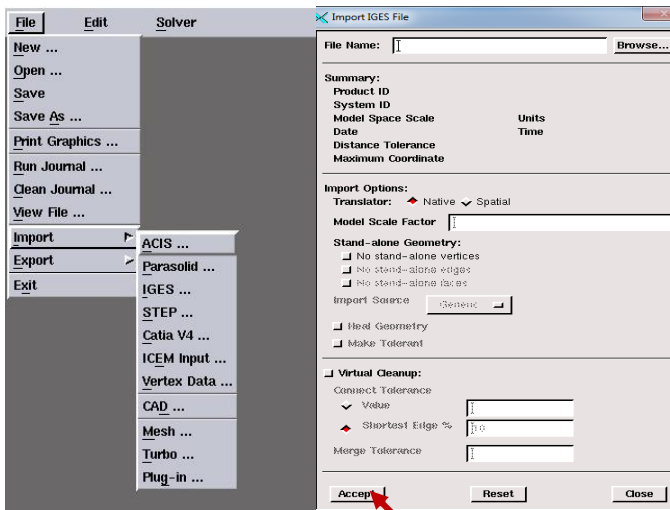
### 3.1.3 *Meshing*

Bidang atau volum yang diisi oleh fluida dibagi menjadi sel-sel kecil (*meshing*) sehingga kondisi batas dan beberapa

parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen kecil tersebut. Bentuk *mesh* yang dipilih untuk pemodelan 2D adalah *quadrilateral-map*.

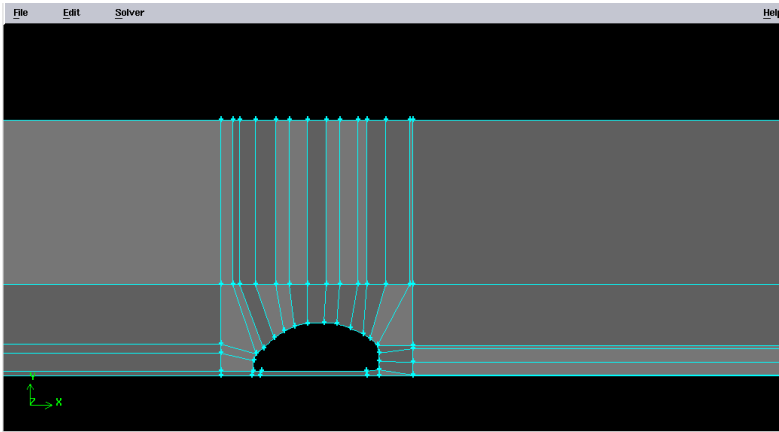
Untuk pembuatan *meshing* pada gambit, geometri 2D pada *solidworks* disimpan dalam format *IGES.igs*. Hal ini dimaksudkan agar memudahkan dalam pembuatan geometri di gambit nanti. Dengan format IGS nantinya hanya tinggal meng-import saja. Berikut langkah-langkah pembuatan *meshing* pada Gambit:

1. Meng-klik File → Import → IGES, kemudian pilih *browse* untuk mencari file yang akan di-*import* ke gambit. Sehingga pada Gambit akan muncul tampilan seperti berikut:

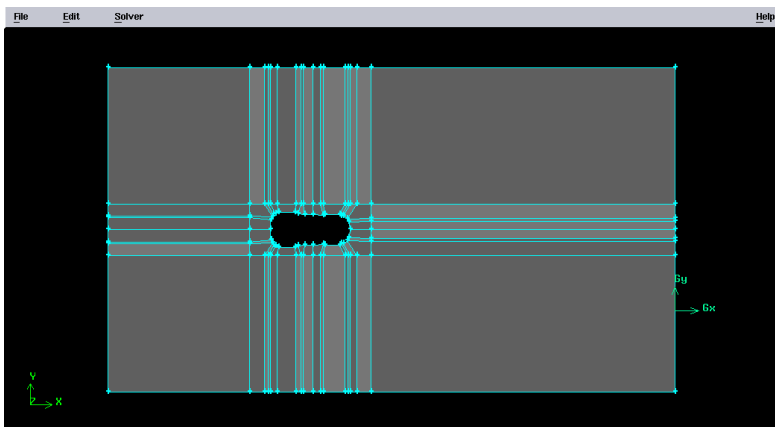


Gambar 3.6 *Import* geometri pada Gambit

2. Membuat geometri gambar menjadi sebuah *face* (ditandai dengan garis berwarna biru muda). Setelah itu dilakukan *subtract* pada mobil dengan domain pemodelan (berupa *wind tunnel*) karena mobil dalam keadaan diam dan akan dialiri fluida (udara).

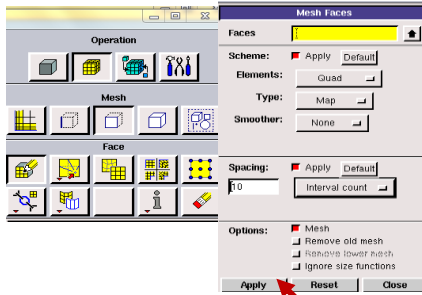


Gambar 3.7 *Facing* 2D Tampak Sampling

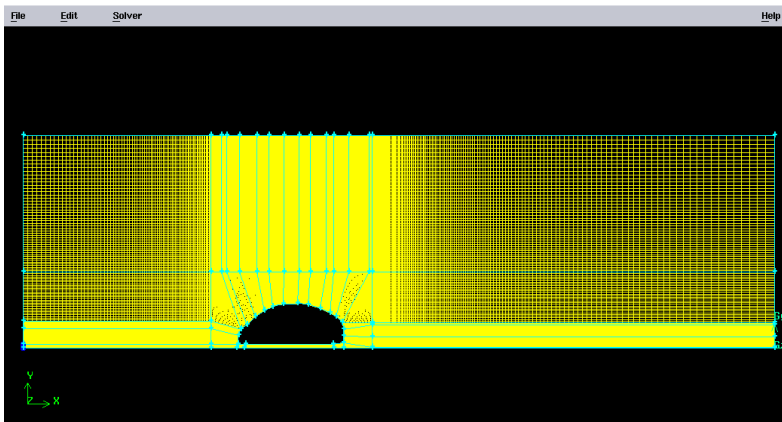


Gambar 3.8 *Facing* 2D Tampak Atas

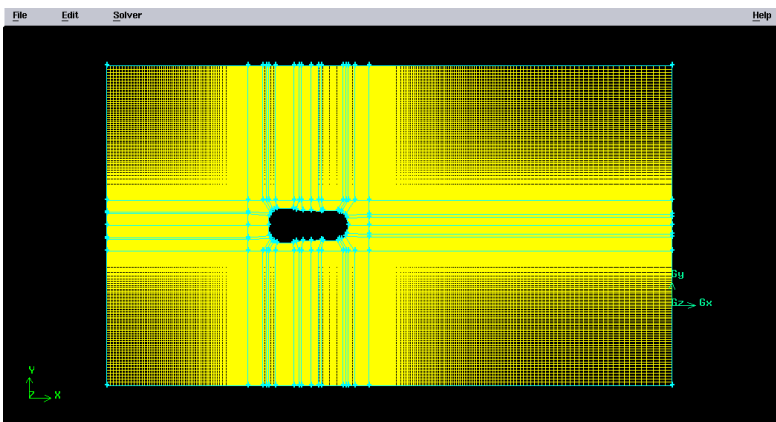
3. Membuat *interval mesh* (klik menu operation *mesh-mesh edge*) kemudian di *meshing* (pilih sub menu *mesh face*)



Gambar 3.9 Menu *Meshing*

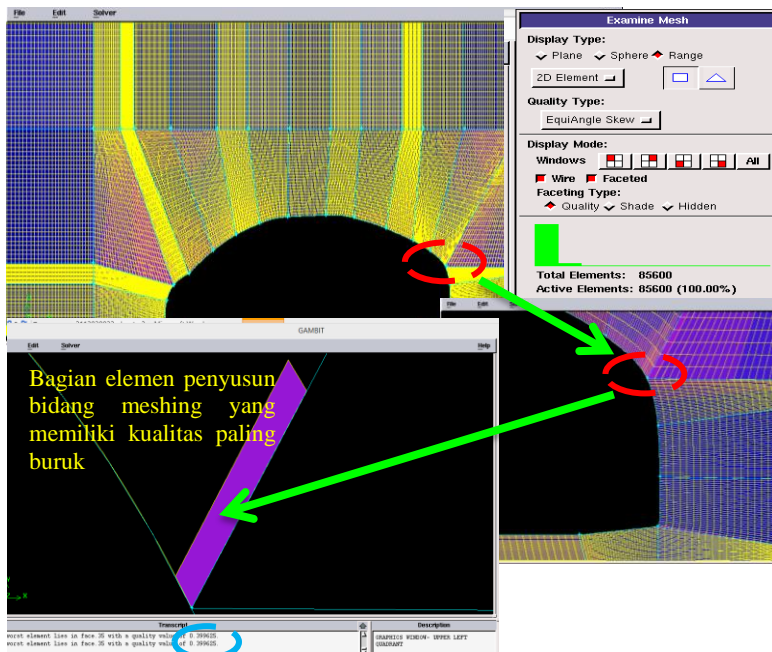


Gambar 3.10 Meshing 2D Tampak Sampling



Gambar 3.11 Meshing 2D Tampak Atas

4. Cek Kualitas *mesh* untuk memeriksa kualitas *meshing* yang telah dibuat pada gambit. Dimana kualitas *mesh*  $\leq 0.4$ .

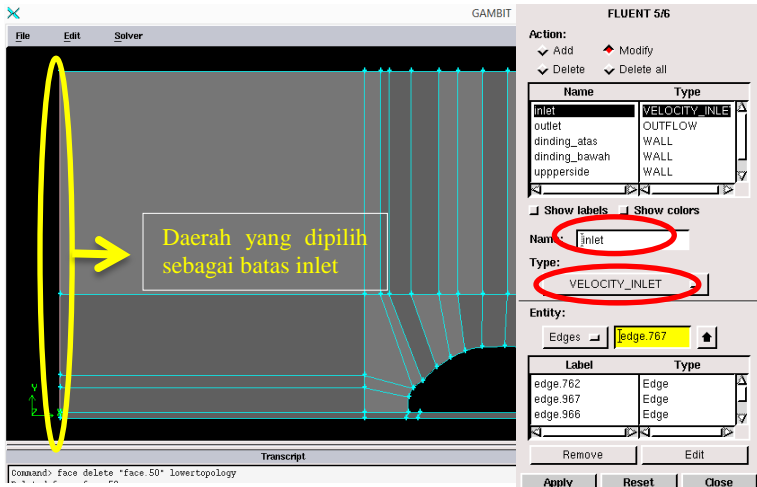


Gambar 3.12 Kualitas *Meshing* Bentuk *Map* dan Tampilan Elemen Penyusun *Meshing* dengan Kualitas

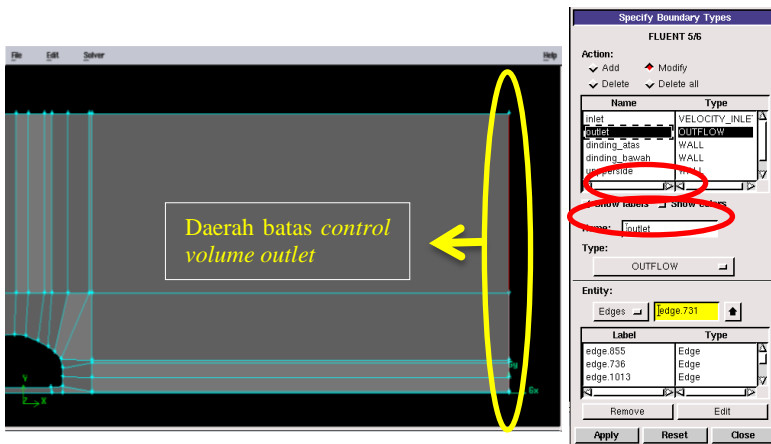
5. Pemberian kondisi batas pada Gambit

Pemberian kondisi batas ini ditujukan agar mempermudah pengambilan data khususnya pemilihan bagian-bagian yang nantinya akan di-input nilai *properties* saat dioperasikan pada *software Fluent 6.3.26*.

Pemberian kondisi batas model ini dibagi menjadi enam kondisi batas yaitu *lowerside* bodi mobil, *upperside* bodi mobil, *inlet* sebagai daerah input *properties* kecepatan awal, *outlet* sebagai batas analisa *control surface* pada model uji, dinding atas dan bawah karena pada analisa model uji ini disimulasikan seolah – olah aliran fluida melewati *contour* bodi mobil di dalam lorong atau terowongan.



Gambar 3.13 Daerah batas kecepatan *inlet*

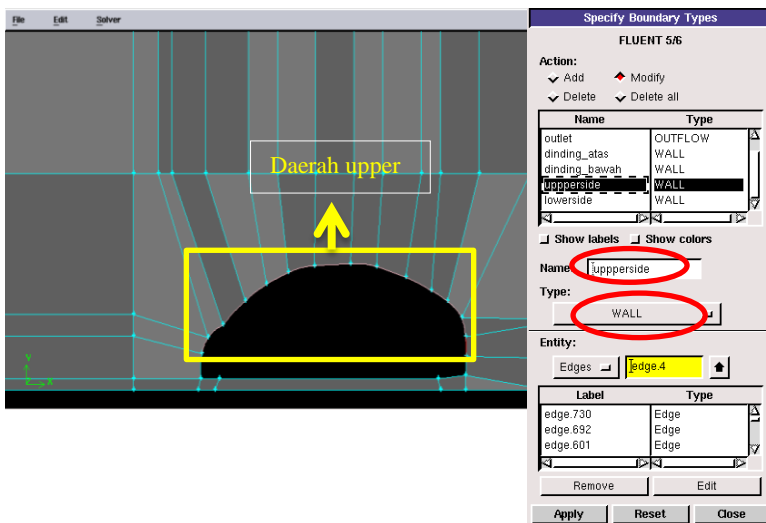


Gambar 3.14 Daerah batas *control volume outlet*

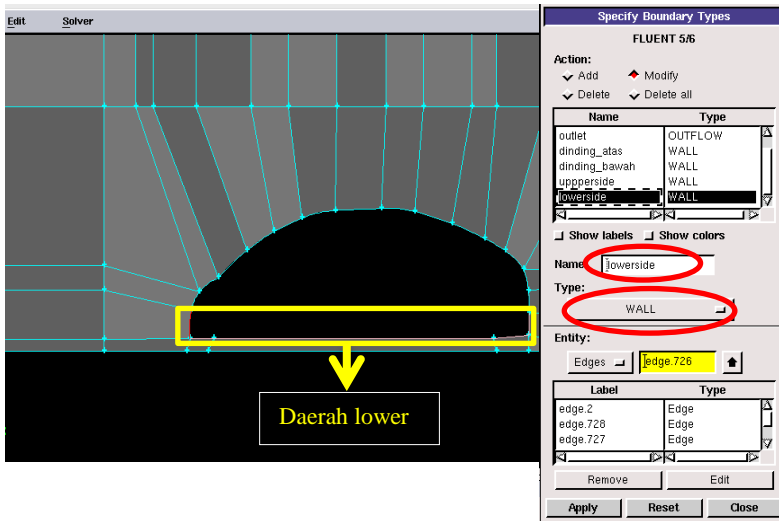
Pada saat memilih batas *outlet* sebagai *control volume* yang perlu diperhatikan adalah pemilihan tipe *outflow*, karena pada tipe *outlet* harus disesuaikan pemilihan di daerah *inlet*. pemilihan ini juga akan mempengaruhi arah distribusi kecepatan pada saat di operasikan pada *software Fluent*.



Gambar 3.15 Daerah batas dinding Atas dan Bawah



Gambar 3.16 Daerah batas bodi mobil *Upperside*



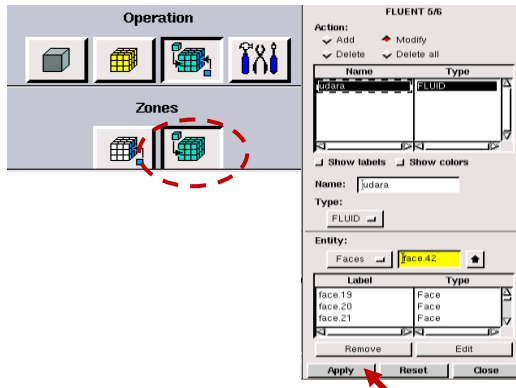
Gambar 3.17 Daerah batas bodi mobil *lowerside*

Pada pemilihan batas dinding atas dan bawah, serta pada *lowerside* dan *upperside* digunakan tipe *wall* agar nantinya kecepatan aliran fluida dengan arah streamline pada daerah batas dinding atas dan bawah serta pada *lowerside* dan *upperside* menjadi nol.

#### 6. Mendefinisikan kondisi batas semua bidang *mesh* sebagai fluida udara.

Pendefinisian ini dilakukan karena *meshing* pada semua bidang akan disimulasikan sebagai fluida udara yang mengalir arah ordinat X negatif menuju ordinat X positif. Serta akan mempermudah analisa *software Fluent* saat dioperasikan model uji tersebut. Berikut merupakan langkah membuat model uji yang mendefinisikan kondisi batas bidang *mesh* sebagai fluida udara dengan cara meng-klik semua bagian *face*.

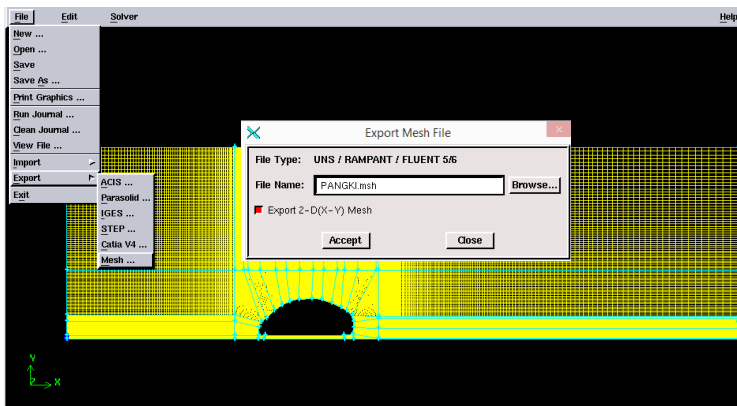




Gambar 3.18 Daerah *mesh* yang didefinisikan sebagai fluida

## 7. Meng-export file kerja GAMBIT

Langkah ini dimaksudkan agar bentuk geometri *meshing* yang telah dibuat pada *software GAMBIT* dapat dioperasikan oleh *software Fluent*. Untuk itu file yang telah dibuat dalam *software GAMBIT* harus di ekspor ke *file type*: *.msh*.



Gambar 3.19 meng-export ke *filetype*;

### 3.1.4 Parameter Pemodelan

Pada pemodelan karakteristik fluida ini akan menggunakan salah satu *software* analisis komputasi fluida dinamik atau *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. *Gambit 2.4.6*

dan *Fluent 6.3.26* merupakan salah satu program dari *CFD*. Langkah pertama dalam pengoperasian *software* ini adalah membuka *software Fluent 6.3.26*. dengan fitur *2ddp*.

Berikut ini merupakan langkah-langkah pemodelan numerik menggunakan *software Fluent 6.3.26* :

### **1. Grid**

*Mesh* model yang telah dibuat di *Gambit 2.2.30* harus dibuka dahulu di *Fluent 6.3.26* agar dapat melakukan analisis sesuai yang diinginkan. Untuk membuka *mesh* model dapat dilakukan melalui perintah *File → Read → Case*

### **2. Check**

*Mesh* model yang telah dibuka pada *Fluent* harus di check terlebih dahulu apakah pada *mesh* tersebut terdapat kesalahan (*error*) atau tidak. Jika terdapat pesan *error* pada konsol *Fluent* atau jika nilai minimum volume adalah *negative* maka *mesh* model tersebut harus diperbaiki terlebih dahulu di *Gambit*. Pengecekan *mesh* ini harus dilakukan agar anda segera mengetahui kesalahan yang ada dan tidak melanjutkan ke langkah berikutnya. Proses pengecekan *mesh* ini dapat dilakukan melalui perintah *Grid → Check*

### **3. Models**

Sebelum menentukan model viscous, harus ditentukan terlebih dahulu apakah aliran yang disimulasikan termasuk aliran laminar atau turbulen. Dalam kasus ini digunakan model *k-epsilon* dengan *realizable* karena diharapkan hasil yang diperoleh akurat dalam memprediksi laju penyebaran fluida.

### **4. Materials**

Langkah yang paling penting dalam pemodelan di *Fluent 6.3.26* adalah mendefinisikan sifat fisik material. Pada *form material* terdapat data-data propertis dan material yang harus dimasukkan. Dalam hal ini material yang digunakan adalah udara dengan *density*  $1,225 \text{ kg/m}^3$  dan *viscouscity*  $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ .

### 5. *Operating Conditions*

Merupakan perkiraan kondisi yang diberikan pada kondisi pengoperasian STP (*Standard, Temperature and Pressure*) berupa tekanan ( $p$ ) disekitar *Mobil Basudewo*, yaitu sebesar 1 atm = 101325 Pascal dan gravitasi =  $9,81 \text{ m}^2/\text{s}^2$

### 6. *Boundary Conditions*

Merupakan penentuan kondisi batas melibatkan beberapa hal, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun pemberian kondisi batas turbulensi pada *inlet*, *outlet* serta kondisi pada *wall*. Pada kondisi batas *inlet* adalah kecepatan sebesar 11.11 m/s dan pada kondisi batas *outlet* adalah *outflow*. Kondisi pada batas dinding atas lorong angin dan batas dinding bawah lorong angin adalah *wall* termasuk juga seluruh bodi dari *Basudewo EV*.

### 7. *Solution*

Solusi pada pemodelan ini adalah menggunakan *simplec* dan diskritisasinya menggunakan *second order, second order upwind*. Yang berarti skema interpolasi yang paling ringan dan cepat mencapai konvergen.

### 8. *Initialize*

Proses *iterate* memerlukan *initialize* (tebakan awal) sebelum memulai perhitungan agar memudahkan konvergen. *Initialize* → *Compute From (inlet)* → *Init* → *Apply*.

### 9. *Monitor Residual*

Menentukan kriteria konvergensi, dalam hal ini iterasi hingga mencapai harga  $10^{-6}$ , artinya *convergence criterion* yang diinginkan. *Convergence criterion* ditetapkan sebesar proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga di bawah  $10^{-6}$ .

## 10. Iterasi

Menentukan kriteria konvergensi (tebakan awal dari hasil iterasi) pada *Fluent* 6.3.26.

### 3.2 Processing atau Solving

Dengan bantuan software *fluent* 6.3.26, kondisi-kondisi yang telah ditetapkan pada saat *preprocessing* akan dihitung (diiterasi). Jika kriteria konvergensi tercapai dengan kriteria konvergensi  $10^{-6}$ , maka tahapan dilanjutkan pada *postprocessing* dan jika tidak tercapai tahapan akan mundur ke belakang pada tahapan pembuatan *meshing*.

### 3.3 Postprocessing

*Postprocessing* merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan data kuantitatif. Data kuantitatif berupa distribusi koefisien tekanan, koefisien *drag* dan koefisien *lift*. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan *pathlines* berupa *velocity magnitude*.

### 3.4 Alokasi Waktu Penelitian

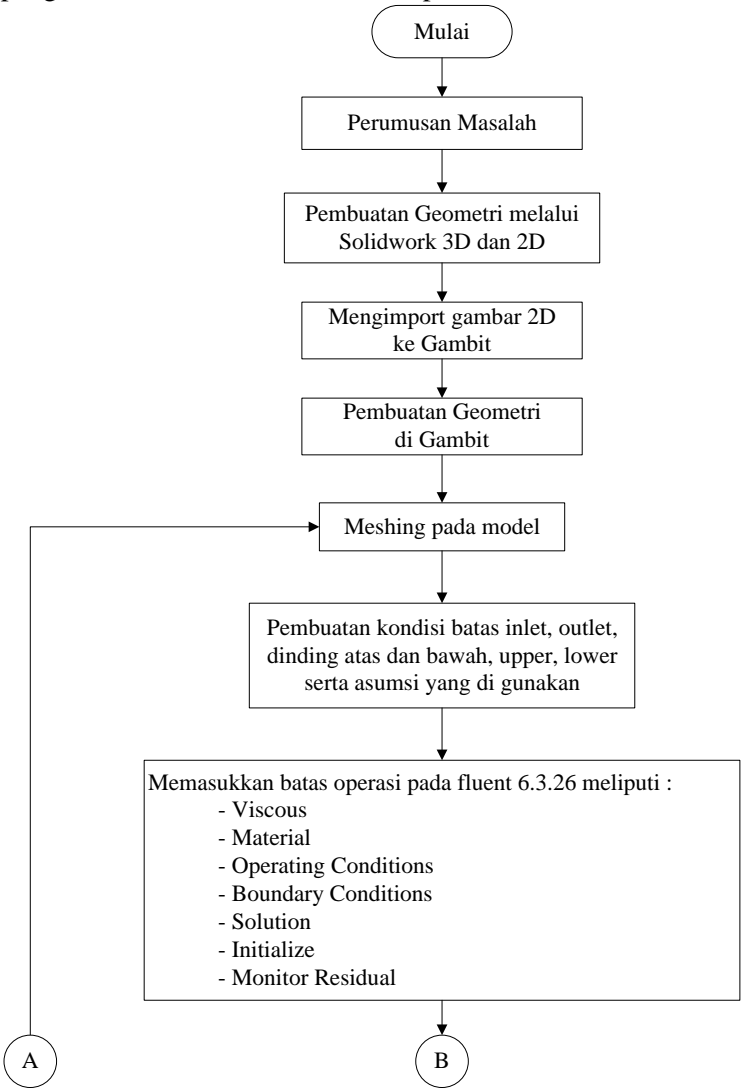
Penelitian ini dijadwalkan dalam waktu enam bulan dengan rincian kegiatan seperti tabel dibawah ini :

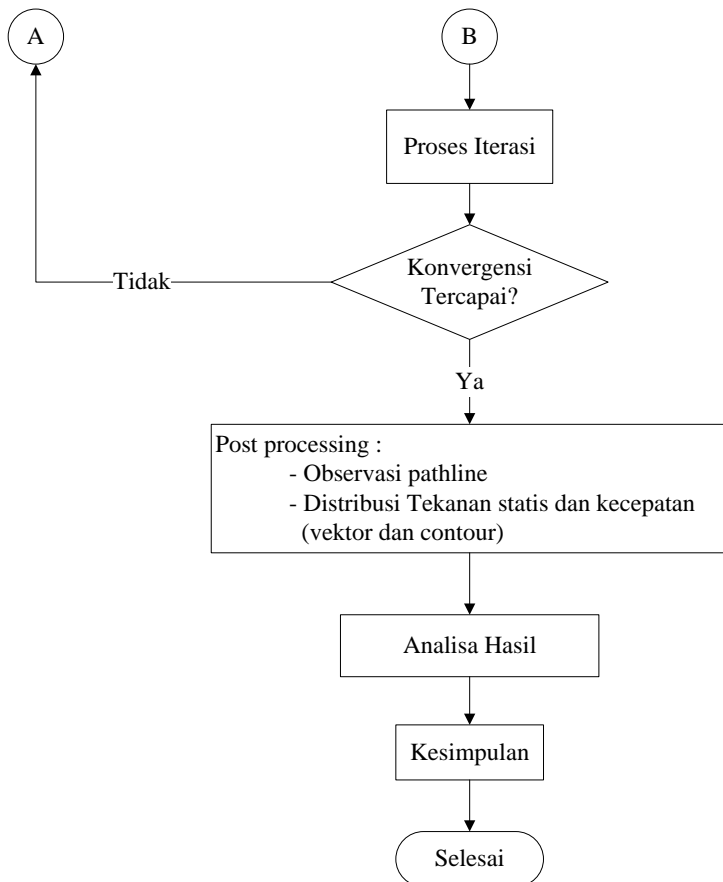
Tabel 3.2 Alokasi Waktu Penelitian

NO	KEGIATAN	WAKTU																							
		I				II				III				IV				V				VI			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Pustaka																								
2	Analisa 2 Dimensi																								
3	Pembuatan model Solid Work 3D																								
4	Pembuatan Meshing Gambit																								
5	Iterasi Fluent																								
6	Postprocessing Data																								
7	Penulisan laporan																								
8	Sidang Tugas Akhir																								

**3.5 Diagram Alir (Flowchart) Metode Penelitian**

Berikut ini adalah metode penelitian yang dipakai dalam penganalisaan karakteristik aliran pada bodi Mobil *Basudewo*. :





Gambar 3.20 *Flowchart* metodologi penelitian

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dilakukan pengamatan pada bagian *centerline* dari kendaraan. Analisa hasil simulasi numerik pada karakteristik aliran fluida yang melintasi bodi *Basudewo EV* dilakukan melalui pemodelan numerik 2D dengan menggunakan *software Fluent 6.3.26*, sehingga memperoleh koefisien tekanan ( $C_p$ ), koefisien drag ( $C_D$ ), koefisien lift ( $C_L$ ), *contour of pressure*, *velocity vector*, *pathlines of velocity*.

### 4.1 Analisa Grid Independensi

Merupakan langkah agar data yang diperoleh akurat, baik pada langkah *post processing* maupun *pre processing*nya. Analisa studi numerik menggunakan *software Fluent 6.3.26*. Hal ini dilakukan juga agar data yang diperoleh dapat divalidasi pada aplikasi sebenarnya. Untuk itu diperlukan langkah *grid independensi* untuk menentukan tingkat serta struktur *grid* terbaik agar hasil pemodelan mendekati sebenarnya.

Tabel 4.1 Analisa *Grid independensi koefisien pressure* pada  $x=85\%L$

Grid	Faces	$C_p$	Kualitas <i>Mesh</i>	$C_D$
A	45868	-0,56123	0,397927	0,19224
B	52900	-0,51803	0,398693	0,19286
C	57808	-0,52996	0,39918	0,19369
D	65500	-0,51257	0,399625	0,19525

Tabel 4.1 menunjukkan variasi *meshing* model uji pada pemodelan 2D di *sidebody centre*. *Meshing A* merupakan *meshing* yang paling renggang dengan jumlah *faces* 45898, sedangkan *meshing D* adalah *meshing* yang paling rapat dengan jumlah *faces* 65500. Dari tabel 4.1 dapat dilihat bahwa pada *mesh B* dan *D* dengan variasi *meshing* yang berbeda, ternyata menghasilkan nilai  $C_p$  yang hampir sama. Oleh karena itu, pada variasi *meshing B* dan *D* dapat disimpulkan bahwa dengan *mesh*

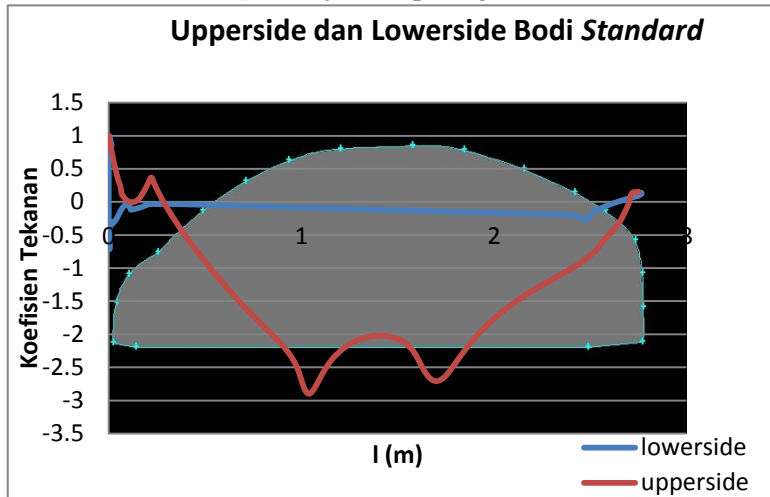


yang berbeda tersebut ternyata memiliki tingkat *grid independence* yang dilakukan oleh solusi secara numerik. Yaitu, meskipun kedua variasi *meshing* tersebut mempunyai selisih *face* yang cukup jauh,  $C_p$  yang dihasilkan relatif sama. Selanjutnya akan digunakan variasi *meshing* D untuk melakukan solusi numerik pada pemodelan *Fluent* 6.3.26. Karena dengan jumlah *face* yang lebih sedikit dari *meshing* D sudah dapat menghasilkan nilai  $C_p$  yang relatif sama dengan penambahan jumlah *face* yang lebih rapat.

## 4.2 Analisa Aliran 2 Dimensi

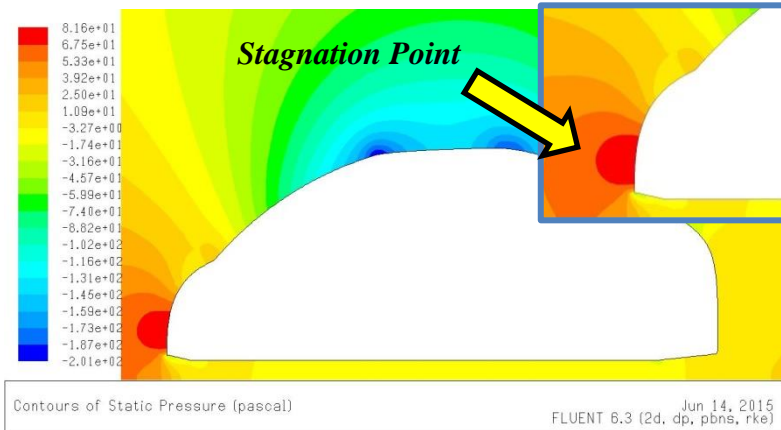
### 4.2.1 Analisa Medan Aliran 2 Dimensi pada Bodi Mobil *Basudewo* Tampak Samping

Analisa distribusi tekanan dapat diperoleh grafik *coefficient pressure* dari bentuk bodi. Karena pengaruh sifat fluida yang bergerak mengikuti bentuk bodi mobil dengan menyamakan prinsip karakteristik aliran, maka bodi mobil dibagi menjadi dua bagian yaitu *upperside* dan *lowerside*. Grafik distribusi  $C_p$  ditunjukkan pada gambar 4.1 berikut ini :



Gambar 4.1 Grafik distribusi koefisien tekanan vs  $l$  (m) pada sepanjang bodi mobil *Basudewo standard*

Analisa distribusi koefisien tekanan dilakukan berdasarkan *display contour coefficient pressure* yang diperoleh dari pemodelan mobil *Basudewo* dengan *software Fluent 6.3.26* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.2 *Contour* koefisien tekanan dipermukaan bodi *Basudewo* tampak samping.

Pada gambar 4.2 terlihat bahwa aliran udara *free stream* mengalir menuju bodi kendaraan. Hal ini menyebabkan tumbukan antara aliran udara dan bagian depan (*leading edge*) kendaraan, sehingga laju aliran fluida mengalami perlambatan. Kemudian kecepatan aliran udara dari *free stream* seolah-olah berhenti dan tekanan yang terjadi di bagian depan bodi kendaraan menjadi tinggi. Pada kondisi seperti ini dinamakan dengan kondisi stagnasi ( $C_p=1$ ). Karena nilai  $C_p = 1$  terjadi di daerah dengan lingkup yang luas, maka disebut *multistagnasi*. Hal ini tampak pada gambar 4.2 yang ditandai dengan warna merah yang mendominasi daerah pada bodi bagian depan.

Setelah aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi dengan cepat menuju lintasan yang berbeda, yaitu aliran udara yang melintasi permukaan atas (*upper side*) dan permukaan bawah (*lower side*) bodi mobil *Basudewo*. Daerah sepanjang  $l=0$  sampai  $l=0,0128$

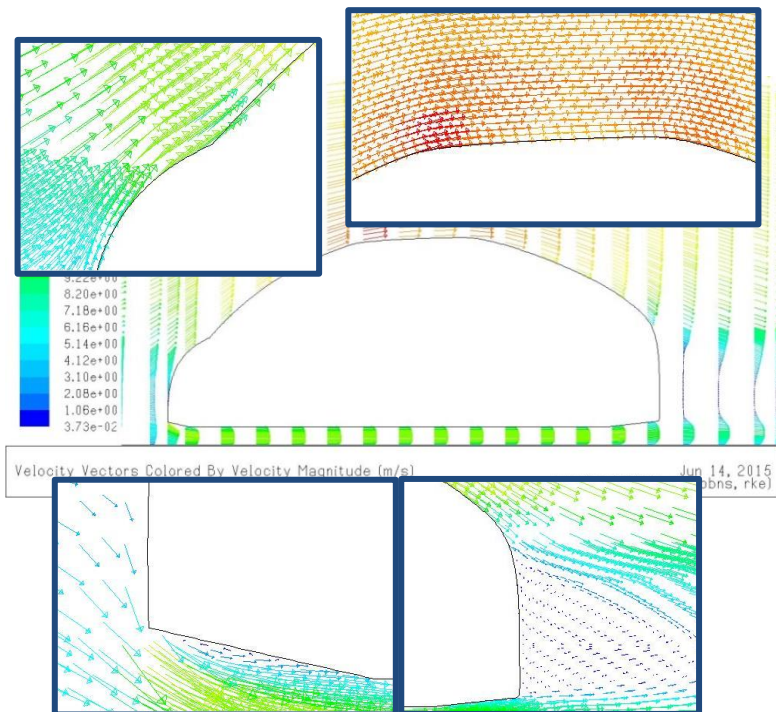
terjadi *multistagnasi* yang menguasai daerah *leading edge* (lihat gambar 4.2)

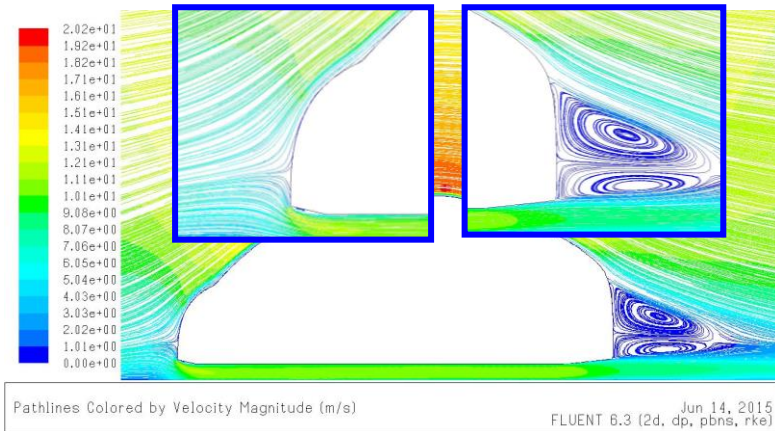
Aliran yang mengalir melewati *upper side* pada awalnya mengalami percepatan dikarenakan aliran udara dipaksa melewati ujung kap mesin (*hood*) yang berbentuk radius. Aliran udara dipercepat pada  $l=0,1239$  dengan nilai  $C_p$  yang minimum yaitu  $-0,00466$ . Karena aliran udara harus melawan gesekan dan perubahan kontur pada kap mesin (*adverse pressure gradient*), maka aliran udara mulai mengalami perlambatan yang ditunjukkan nilai  $C_p$  yang semakin naik. Hal ini karena energi aliran *freestream* lebih mampu mendefleksikan kembali fluida yang telah terseparasi kembali mengikuti kontur bodi mobil *Basudewo*, maka aliran tersebut *attach* kembali yang disebut *separasi bubble*. *Separasi bubble* ini dimulai pada  $l=0,1239$  dan *attach* kembali pada  $l=0,2185$  dengan  $C_p=0,366295$ . Kemudian aliran diperlambat kembali dan mengalami *separasi bubble* pada  $l=1,0417$  dan *attach* kembali pada  $l=1,4204$  dengan  $C_p=-2,01977$  karena harus melawan gesekan saat melewati bagian awal *roof body* (atap bodi). Selanjutnya aliran menuju bagian belakang *roof body* dan terjadi *separasi bubble* kembali pada  $l = 1.6995$  dan *attach* kembali sampai akhirnya aliran terseparasi pada  $l = 2,7509$ . Hal ini menyatakan bahwa nilai  $C_p$  konstan pada akhir *upper side line*. Adanya *separasi* aliran ini karena aliran tidak mampu lagi melawan gesekan dan *adverse pressure gradient*.

Aliran yang mengalir melewati *lower side* pada awalnya mengalami percepatan dari titik stagnasi sampai kecepatan maksimum pada  $l=0,0044$ . Kemudian aliran udara diperlambat dan mulai terjadi *separasi* pada  $l=0,1043$ . Momentum di bawah bodi menjadi tinggi akibat adanya interaksi lapis batas antara bagian bawah bodi dan *ground* sehingga mampu mendefleksikan aliran mengikuti kontur kembali dan *attach* kembali pada  $l = 0.3046$ . Hal ini diindikasikan terjadi *separasi massive* di daerah tersebut. Kemudian aliran dipercepat dengan peningkatan kecepatan aliran tidak terlalu besar (tampak dari grafik bahwa nilai  $C_p$  yang landai sampai pada  $l = 2,4282$ . Setelah itu kecepatan meningkat dan diperlambat

kembali serta akhirnya terseparasi dari kontur bodi pada  $l = 2,4849$ . Meningkatnya kecepatan ini disebabkan oleh penambahan momentum akibat *vortex* pada *wake*. Adanya separasi aliran ini karena aliran sudah tidak mampu melawan gesekan dan *adverse pressure gradient*.

*Boundary layer* muncul di sepanjang bodi mobil *Basudewo* karena adanya efek viskositas dan gradien kecepatan. Hal ini menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji berbeda-beda. Selain itu gradien kecepatan akan mengakibatkan distribusi tekanan di sepanjang permukaan bodi mobil *Basudewo*. Ketika aliran belum menumbuk bodi model uji, pola kecepatan aliran di *upstream* akan sejajar dan tidak ada gangguan pada aliran tersebut. Sedangkan pada pola kecepatan aliran *streamline* di sekitar bodi model uji akan mengalami gangguan aliran akibat pengaruh dari bentuk bodi mobil *Basudewo*.

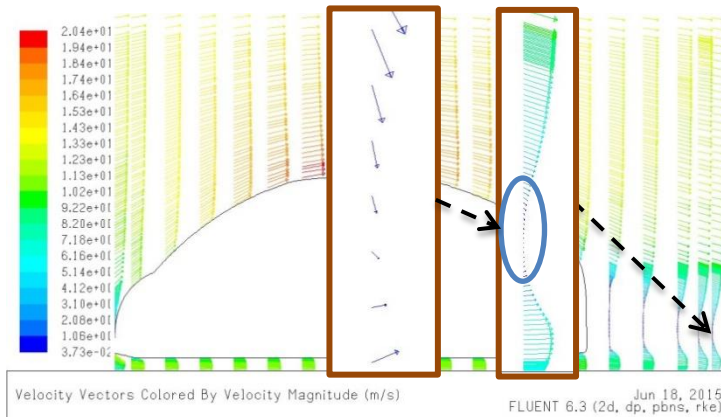




Gambar 4.3 Distribusi *vector velocity* dan *pathlines velocity* pada pemodelan 2D bodi mobil *Basudewo standard* (tampak samping)

Dari gambar 4.3 mengenai distribusi kecepatan terlihat bahwa di daerah *leading edge* terjadi defleksi aliran yang kuat dan menyebabkan awal terbentuknya *separasi bubble* pada kontur *upperside*. Adanya defleksi tersebut membuat penurunan tekanan yang cukup drastis. Terlihat pada gambar, spektrum berwarna merah ( $l = 1.6995$ ) yang merupakan kecepatan maksimum. Pada bagian *leading edge*, aliran cenderung terdefleksi lebih cepat menuju *upperside* dari pada *lowerside*.

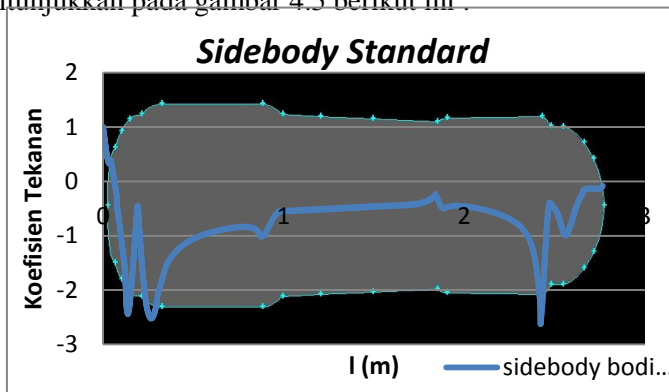
Dan pada bagian belakang bodi, tampak terlihat *wake* (daerah yang bertekanan rendah). Hal ini tampak dari visualisasi *pathlines*. Pada *velocity vector* pada daerah di belakang *wake* yang sudah tidak mengalami backflow ditunjukkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Distribusi *vector velocity* (tidak terjadi *backflow*)

#### 4.2.2 Analisa Medan Aliran 2 Dimensi pada Bodi Mobil *Basudewo Standard* Tampak Atas

Analisa distribusi tekanan dapat diperoleh grafik *coefficient pressure* dari bentuk bodi tampak atas . Karena pengaruh sifat fluida yang bergerak mengikuti bentuk bodi mobil dengan menyamakan prinsip karakteristik aliran, maka bodi mobil dinyatakan sebagai *sidebody*. Garis bodi mobil tampak atas diambil pada koordinat x,y (0,0.23) di *Gambit* yaitu garis yang tampak terluar. Grafik distribusi *Cp* ditunjukkan pada gambar 4.5 berikut ini :

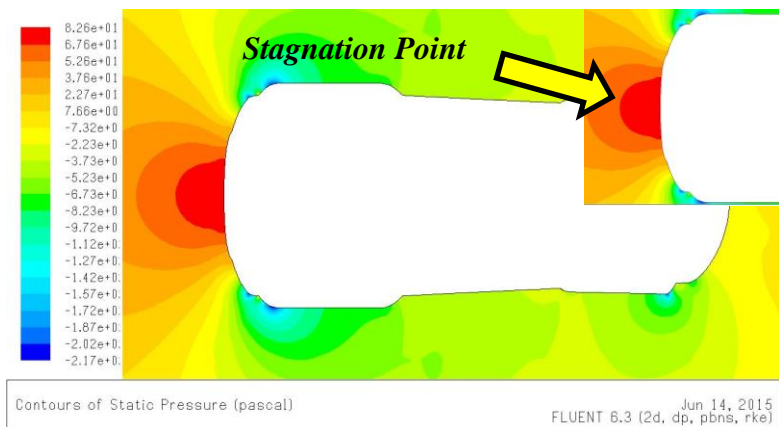


Gambar 4.5 Grafik distribusi koefisien tekanan vs *l (m)* pada sepanjang bodi *Basudewo standard* (tampak atas)

Aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi dengan cepat menuju *sidebody Basudewo*.

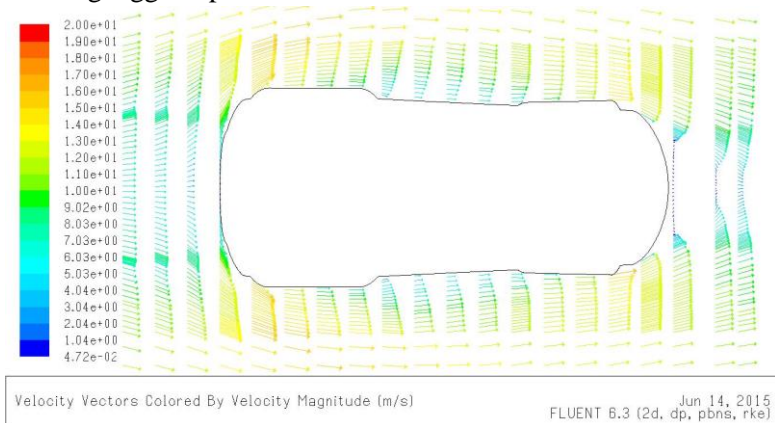
Aliran yang mengalir menuju *sidebody*, pada awalnya mengalami percepatan dikarenakan aliran udara dipaksa melewati bagian depan kontur bodi *Basudewo*. Karena kontur bodi bagian depan ada lekukan (tidak rata) maka aliran udara dipercepat pada  $l = 0,0442$  dan *attach* kembali. Terlihat dari nilai  $C_p$  yang menurun drastis (minimum) yaitu  $-2,4456$  pada  $l = 0,1375$  dan  $C_p = -2,3325$  pada  $l = 0,292$ . Hal ini mengindikasikan terjadinya separasi *bubble*. Selanjutnya Aliran diperlambat kembali (terlihat nilai  $C_p$  yang semakin naik) di lekukan antara *leading edge* dan *wheelcover* dengan ditandai *reattachment flow* dimulai  $l = 0,292$  dengan  $C_p = -2,3325$  sampai kenaikan tekanan pada  $l = 0,7954$  dengan  $C_p = -0,8428$ . Efek *wheelcover* pada bagian roda depan yang terdapat dua lekukan menyebabkan terjadinya separasi *bubble* pada  $l = 0,8732$ . Efek lurus dan ratanya *sidebody* antara *wheelcover* roda depan dan belakang membuat tekanan cenderung stabil pada  $l = 0,9566$  sampai  $l = 1,8401$ . Selanjutnya aliran udara terkena lekukan pertama *wheelcover* roda belakang yang menyebabkan terjadinya separasi *bubble* pada  $l = 1,879$  dengan  $C_p = -0,49212$ . Kemudian aliran *attach* kembali mengikuti kontur *sidebody* dan mengalami perlambatan sampai akhirnya turun drastis kembali dikarenakan lekukan terakhir *wheelcover* roda belakang pada  $l = 2,4222$  pada tekanan minimum,  $C_p = -2,62882$  (terjadi separasi *bubble*). Terjadi kenaikan  $C_p$  karena aliran *attach* kembali mengikuti kontur bodi sampai  $l = 2,4738$ . Kemudian pada  $l = 2,5552$  terjadi separasi *bubble* kembali yang diteruskan dengan *massive separation* (di tandai dengan garis terlihat lurus pada ujung grafik). Kemudian terbentuk wake pada daerah belakang bodi *Basudewo standard*.

Analisa distribusi koefisien tekanan dilakukan berdasarkan *display contour coefficient pressure* yang diperoleh dari pemodelan mobil *Basudewo* dengan *software Fluent 6.3.26* dapat dilihat pada gambar berikut:

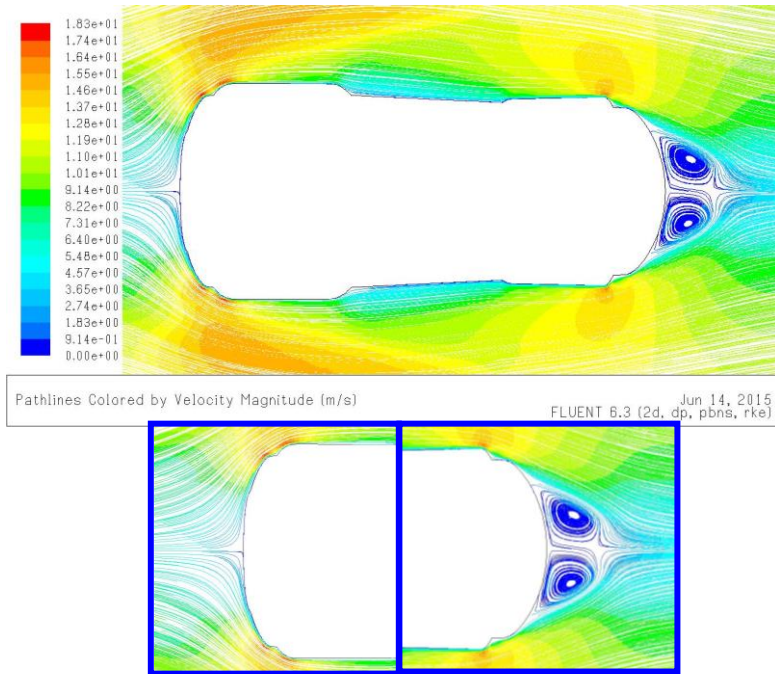


Gambar 4.6 *Contour* koefisien tekanan dipermukaan bodi *Basudewo* tampak atas

*Boundary layer* muncul di sepanjang bodi *Basudewo* karena adanya efek viskositas dan gradien kecepatan. Hal ini menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji berbeda-beda. Selain itu gradien kecepatan akan mengakibatkan distribusi tekanan di sepanjang permukaan bodi *Basudewo*. Ketika aliran belum menumbuk bodi model uji, pola kecepatan aliran di *upstream* akan sejajar dan tidak ada gangguan pada aliran tersebut.







Gambar 4.7 Distribusi *vector velocity* dan *pathlines velocity* pada pemodelan 2D bodi *Basudewo standard* (tampak atas)

### 4.3 Analisa Gaya *Drag* dan *Lift*

#### 4.3.1 Gaya Hambat (*Drag*)

Setiap kendaraan diharapkan mempunyai koefisien *drag* yang rendah karena mempengaruhi besar kecilnya gaya *drag* yang diterima oleh kendaraan.

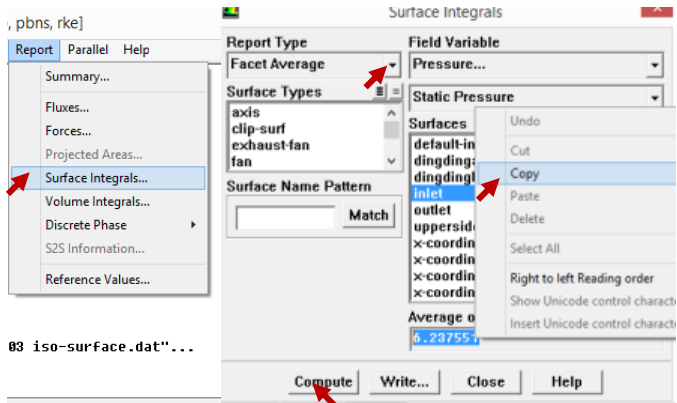
Berdasarkan hasil analisa numerik 2D tampak samping di *Fluent 6.3.26* maka gaya *drag* yang dihasilkan dari bentuk bodi mobil *Basudewo* dapat diketahui dengan beberapa tahap antara lain:

#### 1. Reference Value

Sebelum menentukan gaya *drag* maupun gaya *lift* perlu adanya data referensi dalam perhitungan gaya aerodinamika

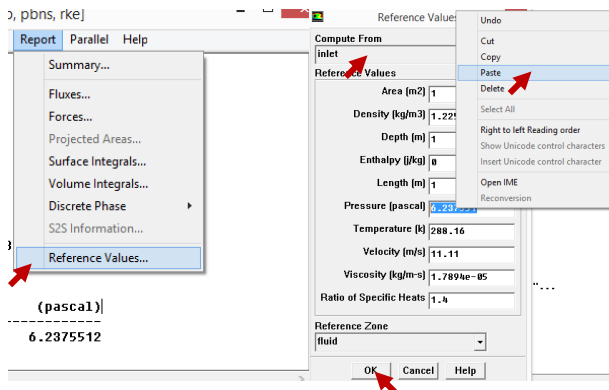
yang terjadi, yaitu dengan cara pengambilan data ulang dari hasil iterasi awal yang telah dilakukan.

Setelah proses iterasi *convergence*, kemudian pilih *report > surface integrals* seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.8 *Surface integrals*

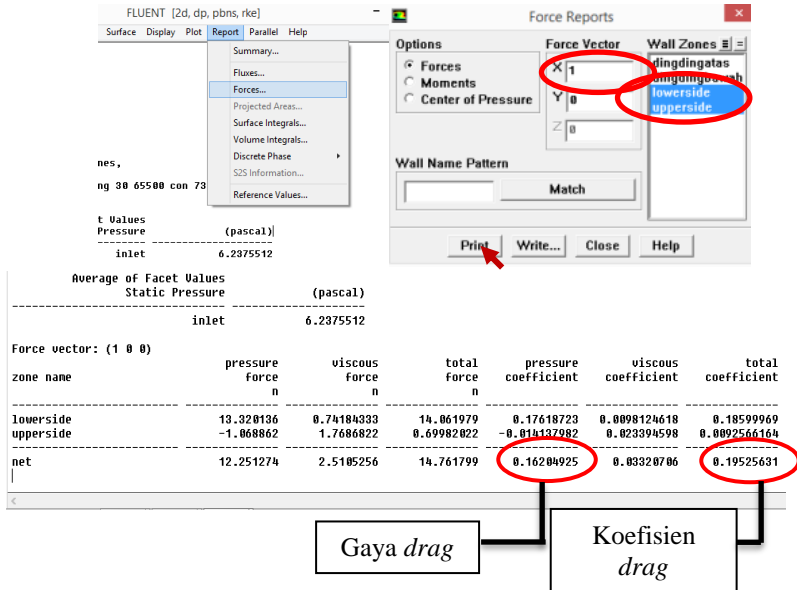
Kemudian pilih *reference values* seperti pada gambar berikut. Langkah ini dilakukan agar tekanan udara saat beroperasi sama dengan kondisi real ketika mobil disimulasikan artinya data perhitungan yang diperoleh, merupakan hasil dari simulasi numerik yang diinginkan.



Gambar 4.9 *Reference Values*

## 2. Force Report

Merupakan fitur untuk menampilkan nilai nominal dari segala macam gaya aerodinamika yang terjadi pada model uji yang disimulasikan. Untuk menentukan gaya drag akan dijelaskan pada gambar berikut.



Gambar 4.10 Gaya drag dan Koefisien drag yang diperoleh

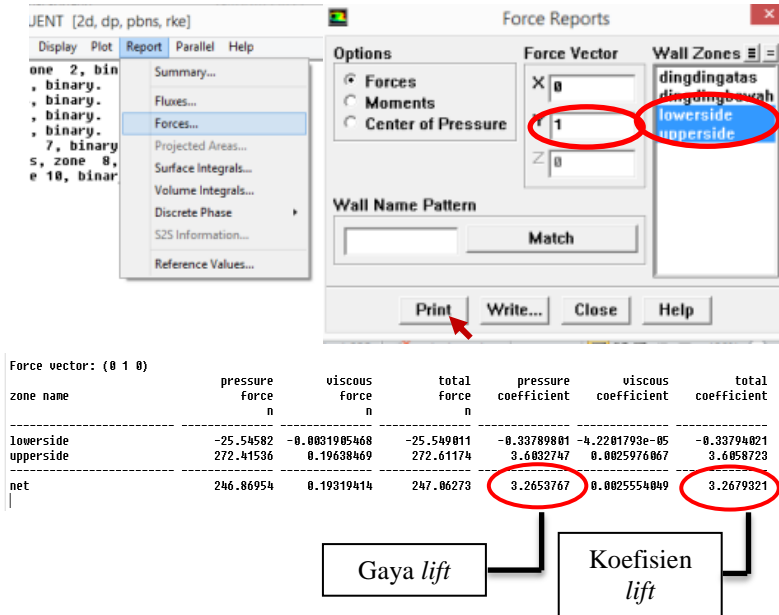
### 4.3.2 Gaya Angkat (Lift)

Koefisien lift yang dihasilkan oleh kendaraan harus kecil untuk mengurangi gaya angkat (lift) pada kendaraan.

Berdasarkan hasil analisa numerik 2D tampak samping di *Fluent 6.3.26* maka gaya lift yang dihasilkan dari bentuk bodi mobil *Basudewo* dapat diketahui dengan beberapa tahap antara lain:

#### 1. Force Report

Merupakan salah satu fitur yang menampilkan nilai nominal dari segala macam gaya aerodinamika yang terjadi pada model uji yang disimulasikan. Untuk menentukan gaya lift akan dijelaskan pada gambar berikut.

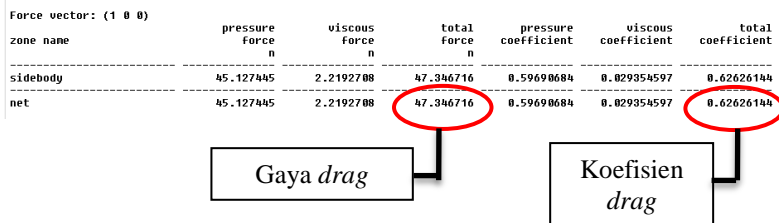


Gambar 4.11 Gaya lift dan Koefisien lift yang diperoleh

### 4.3.3 Gaya Hambat Tampak Atas

Setiap kendaraan diharapkan mempunyai koefisien *drag* yang rendah karena mempengaruhi besar kecilnya gaya *drag* yang diterima oleh kendaraan.

Berdasarkan hasil analisa numerik 2D tampak atas di *Fluent 6.3.26* maka gaya *drag* yang dihasilkan dari bentuk bodi mobil *Basudewo* didapat hasil sebagai berikut :



Gambar 4.12 Gaya drag dan Koefisien drag yang diperoleh pada tampak atas

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisa aliran melintasi bodi mobil *Basudewo* menggunakan pemodelan numerik *software Fluent 6.3.26*, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. *Coefficient drag* ( $C_D$ ) yang diperoleh saat simulasi pada bodi mobil *Basudewo* bernilai 0,1952. sedangkan *coefficient lift* ( $C_L$ ) yang diperoleh saat simulasi pada bodi mobil *Basudewo* bernilai 3,2679.
2. Terjadi beberapa separasi *bubble* dan separasi *massive* pada daerah *upperside*, *lowerside* dan *sidebody* bodi mobil *Basudewo*.
3. Aliran cenderung terdefleksi ke daerah *upperside* dibandingkan daerah *lowerside*
4. *Coefficient drag* ( $C_D$ ) yang diperoleh saat simulasi pada bodi mobil *Basudewo standard* tampak atas bernilai 0,6262.

#### **5.2 Saran**

Adapun beberapa saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pada pembuatan model Gambit diharapkan titik pusat mobil bagian *leading edge* berada pada titik x,y (0,0) untuk memudahkan dalam pembacaan pada grafik  $C_p$  vs  $l$ .
2. Pada analisa model uji 2D dirasa kurang akurat dalam analisa bodi mobil, seharusnya analisa 2D pada aliran yang melintasi mobil merupakan sarana untuk melengkapi data pada simulasi 3D.

3. Pada analisa 2D yang akan datang hendaknya juga mempertimbangkan modifikasi bentuk bodi yang mempengaruhi nilai  $C_L$  pada aliran yang melintasi bodi melalui pendekatan  $C_P$  pada kondisi stagnasi, karena kenaikan  $C_L$  ini juga akan mempengaruhi kestabilan mobil saat melaju terutama saat pada tikungan atau belokan.

## DAFTAR PUSTAKA

Anderson John D. JR. 1988. *Fundamentals of aerodynamics*: International Edition. Singapore: McGraw-hill Book Co.

Bao, F., and Dallmann, Uwe Ch., (2004), "Some physical aspects of separation bubble on a rounded backward-facing step", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 8, 83-91

Barnard R.H. 1996. *Road vehicle Aerodynamic design*: An Introduction. England: Longman.

Damjanović, Darko, Kozak, Dražan, Ivandić, Željko, and Kokanović, Mato. *Car Design As A New Conceptual And CFD Analysis In Purpose of Improving Aerodynamics*. 2010. Croatia

Firmansyah, Anang. 2014. Studi Numerik Medan Aliran Pada Bodi Mobil Nogogeni 4. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Hucho, W.-H. 1987, "Aerodynamics of Passenger Cars," in *Aerodynamics of Road Vehicles*, Hucho, W-H ed, *Butterworth and Co. Ltd*, London, United

Heisler, Heinz. 2002. "Advanced Vehicle Technology". London England: Butterworth-Heinemann Ltd.

Milliken, W F, Milliken, D L. 1995, "Race Car Vehicle Dynamics", *Society of Automotive Engineers* (SAE) Warrendale, PA.

Nashruddin, Ahmad Haidar. 2012. Studi Numerik Karakteristik Aliran 3 Dimensi di Sekitar Bodi Modifikasi Sapuangin *Urban Concept* dengan Rasio *Ground Clearance* terhadap Panjang Model (C/L) 0,048. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.



Niam, Syahrul. 2012. Studi Numerik Karakteristik Aliran (2D) pada Bodi Mobil GEA dengan *Ground Effect*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Ningrum, Dwina Azizah Setya. 2012. Studi Numerik Modifikasi Bodi Mobil Listrik Pancasona Guna Mereduksi Gaya *Drag*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Prasetyo, Ferry Hari . 2013. Studi Numerik: Pengaruh Modifikasi *Diffusor* Terhadap Gaya Aerodinamika Mobil Listrik Pancasona . Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

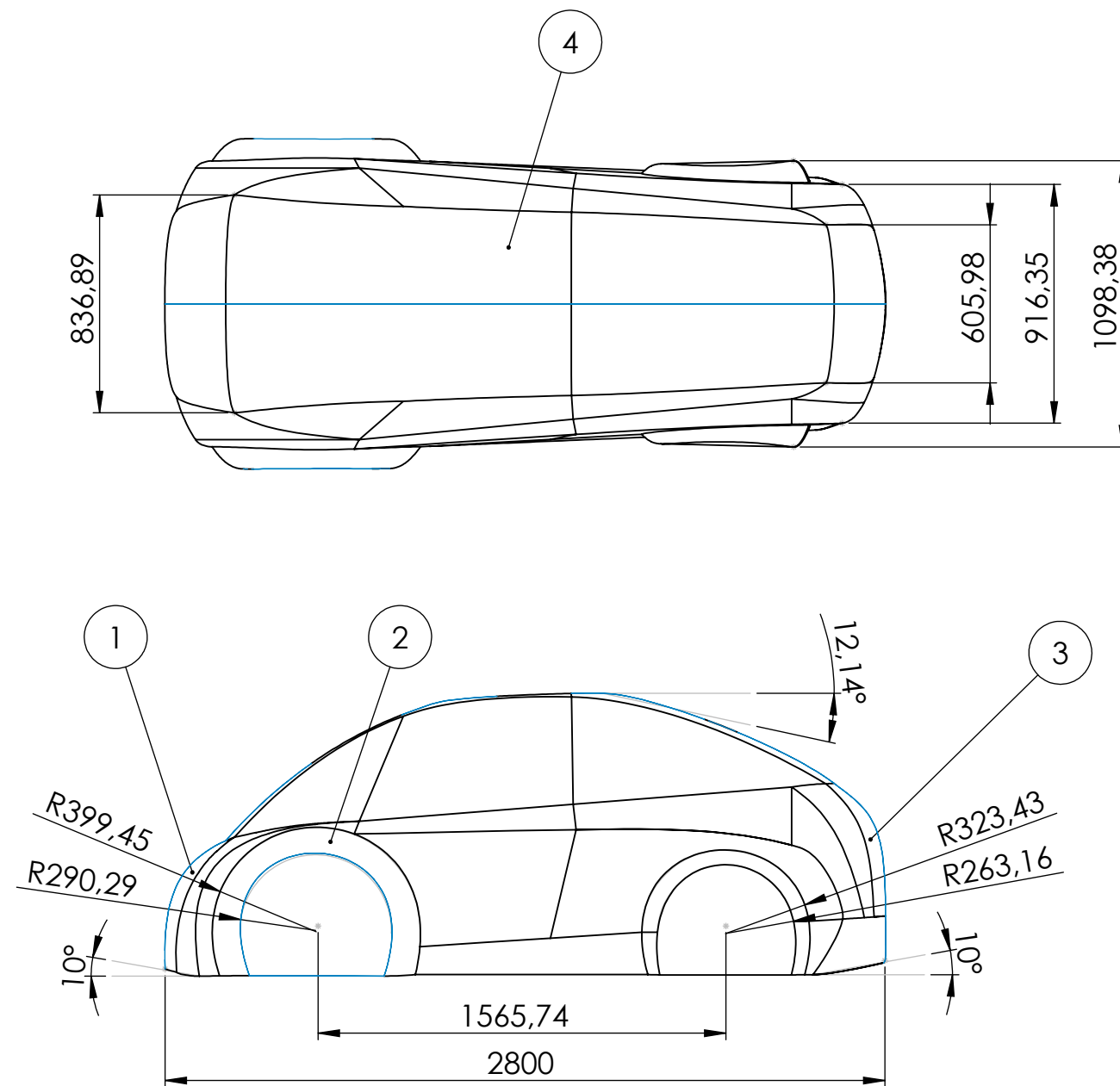
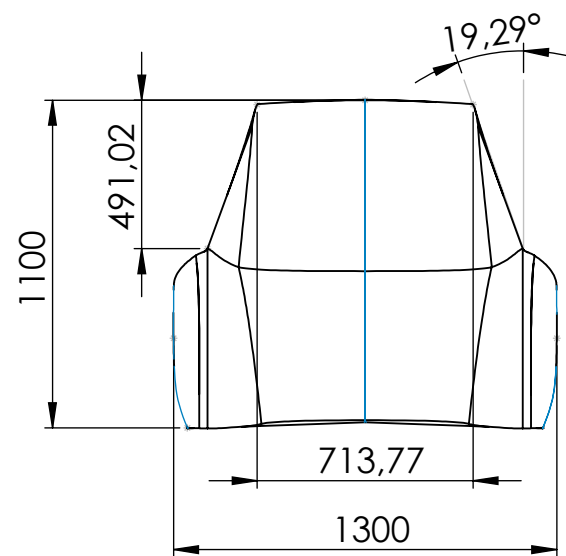
Pritchard, Philip J., Fox and McDonald's. 2011. *Introduction of fluid mechanics: Eight edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc.

Rajamani, Rajesh. 2006. *Vehicle Dyanamics and Control*.USA: Springer Science+Business Media.Inc

Saputra, I Putu A. 2012. Studi Numerik Karakteristik Aliran (2D) Melintasi Bodi Mobil GEA Kondisi *Centerline*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Sutantra, I Nyoman. 2001. Teknologi Otomotif: Teori dan Aplikasinya. Surabaya: Guna Widya.

Tuakia, Firman. 2008. Dasar-Dasar CFD Menggunakan FLUENT. Bandung: Informatika.



4	4	WHEEL COVER	FIBER GLASS		
3	1	REAR END	FIBER GLASS		
2	1	ROOF	FIBER GLASS		
1	1	LEADING EDGE	FIBER GLASS		
NO	JUM-LAH	NAMA BAGIAN	MATERIAL	UKURAN	KETERANGAN
KEKERASAN DALAM $\mu\text{m}$					
		SKALA : 1: 25	DIGAMBAR : PANGKI F.	KETERANGAN:	
		SATUAN : mm	NRP : 2112 030 022		
		TANGGAL : 01-06-15	DIPERIKSA : GIRI N., ST, MSc		
D3 MESIN FTI-ITS		BODI MOBIL BASUDEWO		NO. 1	A3

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama Pangki Ferdiansyah. Penulis dilahirkan di Bangkalan, 15 Maret 1994, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu, SDN Demangan 02 Bangkalan, SMPN 04 Bangkalan, dan SMAN 01 Bangkalan. Pada tahun 2012 Penulis diterima di Jurusan D3 Teknik Mesin FTI – ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2112 030 022. Konversi Energi merupakan bidang studi yang dipilih penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir.

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan baik di bidang akademik maupun non akademik. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan untuk menunjang softskill. Kegiatan yang pernah diikutinya antara lain : Pelatihan LKMM Pra TD. Pelatihan LKMM TD, Pelatihan Jurnalistik Dasar. Penulis juga pernah melaksanakan kerja Praktek di PT. PJB UP Gresik selama satu bulan di divisi *Mechanical* PLTGU.